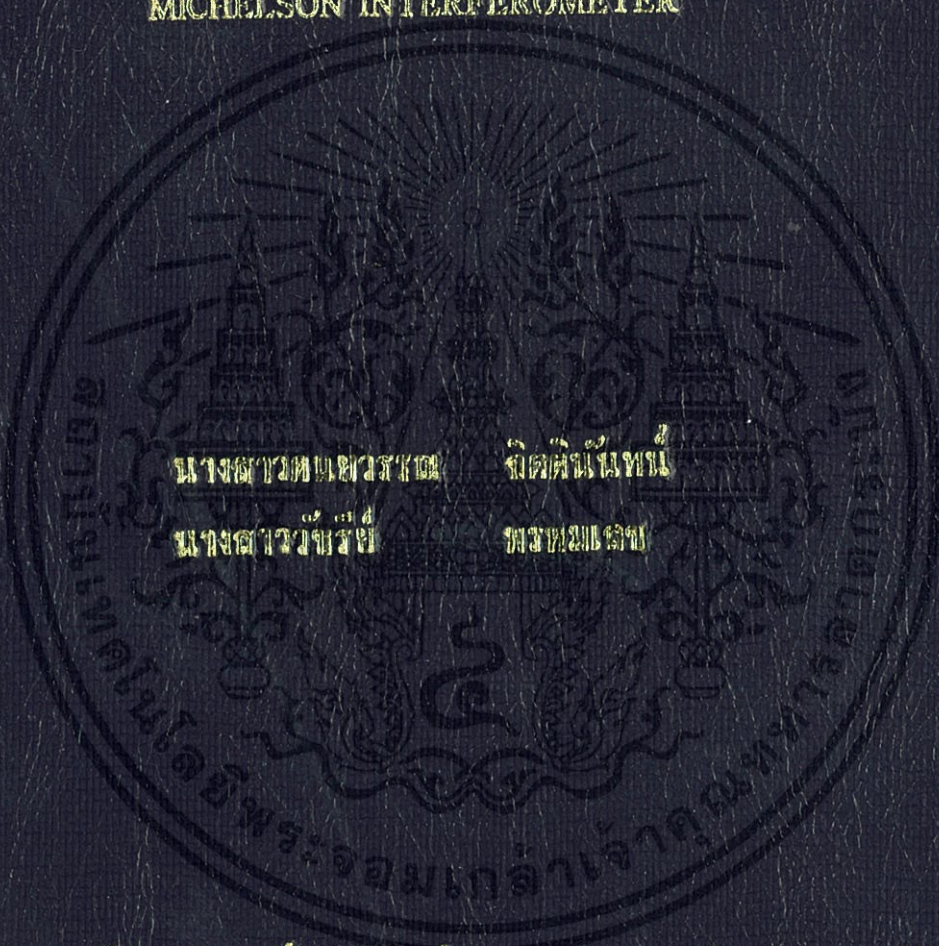


การวัดการกัดกร่อนในโลหะโดยใช้ระบบการวัดเชิงแสงแบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

EVALUATION OF METAL CORROSION USING  
MICHELSON INTERFEROMETER



นางสาวกมลวรรณ นาคะวิเศษ  
นางสาวรุ่งนภา นาคะวิเศษ  
จิตต์พันธ์ นาคะวิเศษ  
พรชยา นาคะวิเศษ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

ตึกสำนักเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การวัดการกัดกร่อนในโลหะโดยใช้กระบวนการไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

EVALUATION OF METAL CORROSION USING MICHELSON  
INTERFEROMETER



นางสาวคนยวรรณ จิตตินันท์  
นางสาววัชรีย์ พรหมเลข

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **คณะวิทยาศาสตร์** นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกหนึ่งหน้าที่ให้รับไปดูแล และแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

ปีการศึกษา 2556

**EVALUATION OF METAL CORROSION USING MICHELSON  
INTERFEROMETER**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE  
REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE IN  
APPLIED PHYSICS**

**FACULTY OF SCIENCE**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ **KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG** ที่ลาดกระบัง

**ACADEMIC YEAR 2013**

**หัวข้อโครงการพิเศษ** การวัดการกัดกร่อนในโลหะโดยใช้กระบวนกรไมเคลิอินเตอร์เฟอริมิเตอร์  
 EVALUATION OF METAL CORROSION USING MICHELSON INTERFEROMETER

**ชื่อนักศึกษา** นางสาวคนขวรรณ จิตตินันท์  
 นางสาววัชรีย์ พรหมเลข

**ปริญญา** วิทยาศาสตร์บัณฑิต

**สาขาวิชา** ฟิสิกส์

**อาจารย์ที่ปรึกษา** อาจารย์สุรชาติ กมลฉิลก

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ		ลายมือชื่อ
ดร.เกียรติยศ	ศรินวลจันทร์	
ดร.ประธาน	บุรณศิริ	
อาจารย์ธรรมรัตน์	แตงตั้ง	
อาจารย์สุรชาติ	กมลฉิลก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การวัดการกักตร่อนในโลหะโดยใช้กระบวนการไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวคนยวรรณ จิตตินันท์ นางสาววัชรีย์ พรหมเลข
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์สุรชาติ กมลดิลก

### บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการวัดการกักตร่อนในโลหะโดยใช้กระบวนการไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ โดยจะประกอบด้วยระบบการแทรกสอดของแสงด้วยวิธีของไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์และระบบการกักตร่อนในโลหะที่นำมาทำการทดสอบ ซึ่งระบบการทดลองนี้ใช้แหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์ฮีเลียมนีออนมีความยาวคลื่นเท่ากับ 632.8 นาโนเมตร โดยทำการติดตั้งชิ้นงานที่ทำการทดสอบไว้ที่แขนข้างหนึ่งของระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ เมื่อเกิดการกักตร่อนของโลหะโดยกรดไฮโดรคลอริกจะทำให้ร้วการแทรกสอดมีการเปลี่ยนแปลงจากจำนวนร้วการแทรกสอดที่เปลี่ยนแปลงสามารถหาค่าความลึกที่ถูกกักตร่อนในโลหะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คำสำคัญ :** การกักตร่อน, ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์

<b>Title</b>	Evaluation of Metal Corrosion Using Michelson Interferometer
<b>Name</b>	Miss Donyawan Jittinun Miss Watcharee Promlek
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major Program</b>	Physics
<b>Academic Year</b>	2013
<b>Advisor</b>	Mr.Surachart Kamoldilok

### ABSTRACT

This special project is metal corrosion using Michelson interferometry. The method consists of the system of interference light by Michelson interferometer configuration and metal corrosion system. Helium-Neon laser at wavelength of 632.8 nanometers can be used as light source. The samples were set at the arm of Michelson interferometer, then metal corroded by hydrochloric acid, that effect to the number of fringe. The depth of metal corrosion can be investigated by the effect change of number of fringe.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Keywords :** corrosion, Michelson interferometer

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก อาจารย์ สุรชาติ กลมดิลก อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขในการดำเนินการจัดโครงการพิเศษ ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งและถือเป็นพระคุณอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ในสาขาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้ความรู้ ให้คำแนะนำ และให้ความคิดเห็นเป็นอย่างดีเสมอมา ทำให้ได้ข้อมูลครบถ้วนในการวิจัยครั้งนี้

คุณงามความดีอันพึงมีจาก โครงการพิเศษฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพยิ่งและคณาจารย์ผู้ประสาทวิชาความรู้ ตลอดจนทุกๆ ท่านที่ให้กำลังใจช่วยเหลือตลอดจนกระทั่งโครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

คนยวรรณ จิตตินันท์

วัชรีย์ พรหมเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
คำย่อและสัญลักษณ์	VIII

<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2

<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	3
2.1 ไมเคลิสันอินเตอร์พีรอมิเตอร์	3
2.2 หลักการของไมเคลิสันอินเตอร์พีรอมิเตอร์	3
2.3 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี	7
2.3.1 ประเภทของการกักกร่อน	8
2.3.3.1 การกักกร่อนแบบสม่ำเสมอ	8
2.3.3.2 การกักกร่อนในบริเวณจำเพาะ	8
2.4 ฮีเลียมนีออนเลเซอร์	11
2.5 กรดเกลือหรือไฮโดรคลอริก	19

<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย</b>	20
3.1 การออกแบบระบบการวัดการกักกร่อนในโลหะ	20
3.1.1 ศึกษาและออกแบบระบบการวัดการกักกร่อนในโลหะ	20

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.1.2 การจักระบบการวัดการกักกร่อนในโลหะ	21
3.2 การทดสอบระบบการวัดการกักกร่อนในโลหะ	24
3.2.1 ระบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์	24
3.2.2 ระบบการวัดการกักกร่อนในโลหะ	25
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปราย</b>	27
4.1 วิธีการทดลองและการวิเคราะห์การกักกร่อนของอะลูมิเนียมที่ความเข้มข้นของสารละลายที่ต่างกัน โดยการใช้ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์	27
4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ถูกกักกร่อนของกระจกเคลือบอะลูมิเนียมและระยะเวลาในการกักกร่อน	27
4.1.2 การวิเคราะห์ข้อมูลกราฟ	27
4.1.3 การเตรียมความเข้มข้นของสารกักกร่อน	27
4.1.4 การสอบเทียบเครื่องมือวัด	28
4.2 ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัด โดยการใช้ไมโครมิเตอร์	28
4.3 ผลการทดสอบความเหมาะสมของสารละลายที่จะนำมาใช้ในการทดลองที่ความเข้มข้นต่างๆ	29
4.4 ผลการทดลองการกักกร่อนของกระจกเคลือบอะลูมิเนียม	30
4.5 ผลการตรวจสอบการกักกร่อนของกระจกเคลือบอะลูมิเนียม	32
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการทดลอง	33
5.2 ข้อเสนอแนะ	33
5.3 แนวทางพัฒนา	33
<b>บรรณานุกรม</b>	34

เอกสาร **ภาคผนวก ก** ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
 ไม่ว่า **ภาคผนวก ข** อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ **ไปใช้**

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัด โดยการใช้ไมโครมิเตอร์	29
4.2 การทดสอบสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้นต่างๆ	30
4.3 การกักกรองของกระจกเคลื่อนอะลูมิเนียม	31
4.4 การตรวจสอบการกักกรองของกระจกเคลื่อนอะลูมิเนียม	32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	3
2.2 พิจารณาแนวทางเดินแสงทั้งหมด	4
2.3 รูปแบบของรีวการแทรกสอดวงกลม	6
2.4 ขั้นตอนการเกิดการกั้คร่อนบริเวณชอก	9
2.5 การกั้คร่อนแบบหลุมบนผิวของโลหะ	10
2.6 (ก) การกั้คร่อนกั้เจาะในท่อน้ำ (ข) กั้คร่อนกั้เจาะในท่อที่มีรูปร่างต่างกัน	10
2.7 กระบวนการ dezincification ในท่อทองเหลืองของระบบหล่อเย็น	11
2.8 แสดงชั้นพลังงานของอะตอม	12
2.9 การดูคลื่นแสง	13
2.10 การปล่อยแสงแบบเกิดขึ้นเอง	13
2.11 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดเลเซอร์	15
2.12 ระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องของฮีเลียมนีออนเลเซอร์ M ระบุสถานะกั้เสถียร โดยที่ $e_1$ และ $e_2$ เป็นพลังงานอิเล็กตรอนก่อนและหลังการชนกัน	17
2.13 โครงสร้าง ฮีเลียมนีออนเลเซอร์ที่มีกระจกติด	18
2.14 แบบจำลองอะตอมของกรดไฮโดรคลอริก	19
3.1 ระบบการวัดการกั้คร่อนในโลหะ โดยการใช้กระบวนการไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	20
3.2 แหล่งกำเนิดแสง	21
3.3 กระจกสะท้อน	22
3.4 ตัวกลางแยกลำแสง	22
3.5 ฉากรับภาพ	23
3.6 เลนส์ขยาย	23
3.7 ตัวตรวจจับแสงและเครื่องนับรีวการแทรกสอด	24
3.8 รีวการแทรกสอดของแสง	24
3.9 การติดตั้งอุปกรณ์บริเวณโตะลดการสันสะท้อนทางแสง	25
3.10 อุปกรณ์ที่ใช้ในการกั้คร่อนโลหะ	25
3.11 กระจกเคลือบอะลูมิเนียม	26
3.12 สารละลาย	26
4.1 กราฟความสัมพันธ์ของความลึกที่ถูกกั้คร่อน	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
BS	Beam splitter
R	Reflected
T	Transmitted
M	Mirror
S	Light source
H	Hydrogen
O	Oxygen
Al	Aluminium
Fe	Iron
Mo	Molybdenum
Pd	Palladium
Ti	Titanium
Co	Cobalt
Cr	Chromium
Ni	Nickel
Zn	Zinc
C	Carbon
E	Energy level
He	Helium
Ne	Neon
HCl	Hydrochloric acid
$H_2O$	Hydrogen dioxide
$OH^-$	Hydroxide
L	Lens
d	ระยะห่าง( $\mu m$ )
$\Delta d$	ความลึกที่ถูกกัดกร่อนของโลหะ( $\mu m$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักศึกษาชั้นปริญญาโทและปริญญาเอกเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าในรูปแบบใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ	ความหมาย
$\phi$	เฟส(เรเดียน)
$\Delta m$	อันดับของรีวการแทรกสอด
$\lambda$	ความยาวคลื่นของแสง(nm)
$e^-$	อิเล็กตรอน
$V$	ปริมาตร(dm <sup>3</sup> )
$\bar{x}$	ค่าเฉลี่ย
$n$	จำนวน
$\sigma$	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน
$\sigma_x$	ค่าความไม่แน่นอนในการวัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันมีการนำไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ (Michelson Interferometer) มาใช้ในการวัดสิ่งต่างๆ ซึ่งไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์สามารถใช้ในการวัดหาความเร็วต่างๆ ได้ ทั้งความเร็วแสงในทิศทางต่างๆ ความเร็วลม เป็นต้น และใช้วัดการกัดกร่อนในโลหะได้อีกด้วย โดยไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่อาศัยหลักการแทรกสอดของคลื่นแสงสองขบวน คลื่นที่แทรกสอดกันจะเกิดเป็นฟริ่ง (Fringe) หรือริ้วการแทรกสอด ถ้าแสงทั้งสองขบวนต้องเป็นแสงโคฮีเรนต์ และกำเนิดจากแหล่งกำเนิดเดียวกันถึงจะสามารถสังเกตริ้วการแทรกสอดที่เกิดได้ โดยอาศัยหลักการทางแสงของอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์สามารถวัดระยะทางในเทอมของความยาวคลื่นได้ โดยอาศัยการนับริ้วการแทรกสอดของคลื่นแสงสองขบวนที่แทรกสอดกัน

การวัดการกัดกร่อนในโลหะโดยการใช้กระบวนการไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ จะมีความสำคัญมาก เนื่องจากการวัดที่มีความแม่นยำ ซึ่งจะทำให้การติดตั้งอุปกรณ์ โดยใช้งานโลหะที่เกิดการกัดกร่อน จะเกิดการสูญเสียเนื้อของโลหะ การกัดกร่อนจะเป็นประเภทแบบการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (uniform corrosion) ซึ่งจัดได้ว่าเป็นการกัดกร่อนที่พบมากที่สุด ยกตัวอย่างเช่น สนิมเหล็กคราบดำบนเครื่องเงิน การกัดกร่อนแบบนี้จะเกิดอย่างสม่ำเสมอบนผิวของโลหะ และมักจะรอยไว้ ซึ่งรอยดังกล่าวนี้สามารถป้องกันหรือว่ากำจัดได้ง่าย

ในโครงการฉบับนี้เป็นการวัดการกัดกร่อนของโลหะอะลูมิเนียม (Aluminium) หรือมีสัญลักษณ์คือ Al โดยจะทำการใช้ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์มาใช้ในการวัด

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการติดตั้งอุปกรณ์ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการกัดกร่อนของโลหะอะลูมิเนียมที่ความเข้มข้นต่างๆ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการวัดการกัดกร่อนโดยใช้กระบวนการไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์
- 1.2.4 เพื่อศึกษาการนำริ้วการแทรกสอดที่ได้จากการวัดการกัดกร่อนมาคำนวณหาความลึกที่ถูกกัดกร่อนของแผ่นโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

เป็นการวัดการกักคร่อนในโลหะโดยใช้กระบวนการไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ ซึ่งจะทำ การติดตั้งอุปกรณ์ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ และทำการวัดการกักคร่อนของกระจกเคลือบ อะลูมิเนียม โดยการใส่กรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่างกัน ซึ่งจากการทดลองเราจะทำการกัก คร่อนกระจกเคลือบอะลูมิเนียม โดยทำการวัดรีวการแทรกสอดในเวลาทุกๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำรีวการแทรกสอดที่ได้ไปคำนวณหาความลึกที่ถูกกักคร่อนของแผ่นโลหะ

### 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีในการดำเนินงาน

1.4.1 แผนการดำเนินงาน สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนที่ 1 เสนองานวิจัย
- ขั้นตอนที่ 2 ศึกษารายละเอียด ทฤษฎี และข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการงานวิจัย
- ขั้นตอนที่ 3 ตั้งสมมติฐาน และเตรียมการทดลอง
- ขั้นตอนที่ 4 ทำการทดลองและประเมินผลการทดลอง
- ขั้นตอนที่ 5 ปรับปรุงการทดลองในส่วนที่ผิดพลาด
- ขั้นตอนที่ 6 สรุปการทำวิจัย และแนวทางในการพัฒนาต่อในอนาคต

1.4.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการแต่ละขั้นตอน

เดือน ลำดับ	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
	ขั้นตอนที่ 1											
ขั้นตอนที่ 2												
ขั้นตอนที่ 3												
ขั้นตอนที่ 4												
ขั้นตอนที่ 5												
ขั้นตอนที่ 6												

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถทำการติดตั้งอุปกรณ์ไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ได้

1.5.2 มีความรู้ความเข้าใจในเรื่องการกักคร่อนของโลหะ

1.5.3 สามารถวัดการกักคร่อนในโลหะโดยใช้กระบวนการไมเคลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์ ในการวัดได้

## บทที่ 2

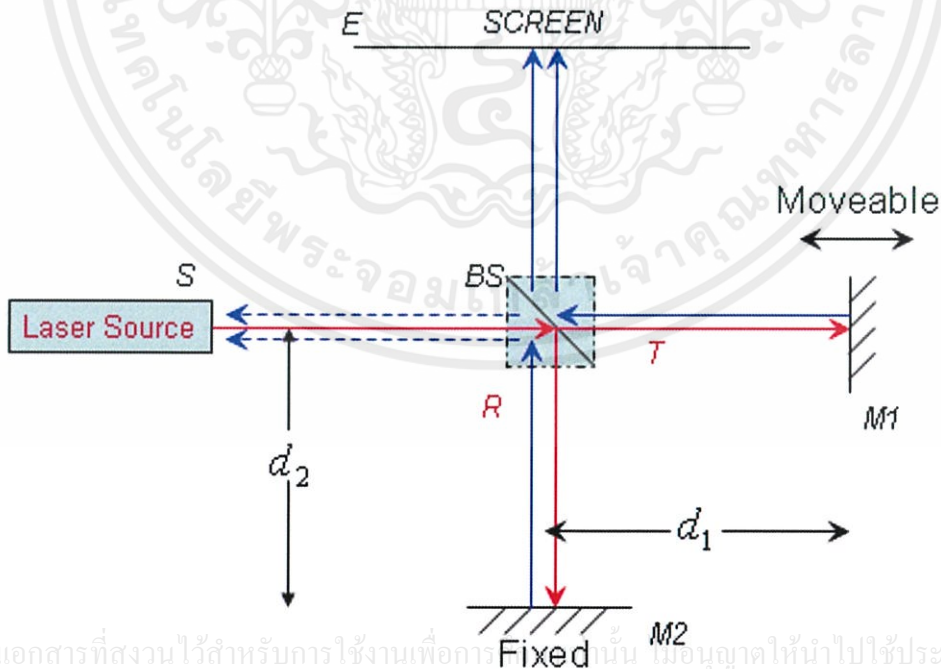
# ทฤษฎีและงานที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ (Michelson Interferometer)

ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่อาศัยหลักการแทรกสอดของคลื่นแสงสองขบวน คลื่นที่แทรกสอดกันจะเกิดเป็นริ้วการแทรกสอด (Fringe) ถ้าแสงทั้งสองขบวนต้องเป็นแสงโคฮีเรนต์และกำเนิดจากแหล่งกำเนิดเดียวกันถึงจะสามารถสังเกตเห็นริ้วการแทรกสอดที่เกิดได้ โดยอาศัยหลักการทางแสงของอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ สามารถวัดระยะทางในทอมของความยาวคลื่นได้ โดยอาศัยการนับริ้วการแทรกสอด ของคลื่นแสงสองขบวนที่แทรกสอดกัน

### 2.2 หลักการของไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

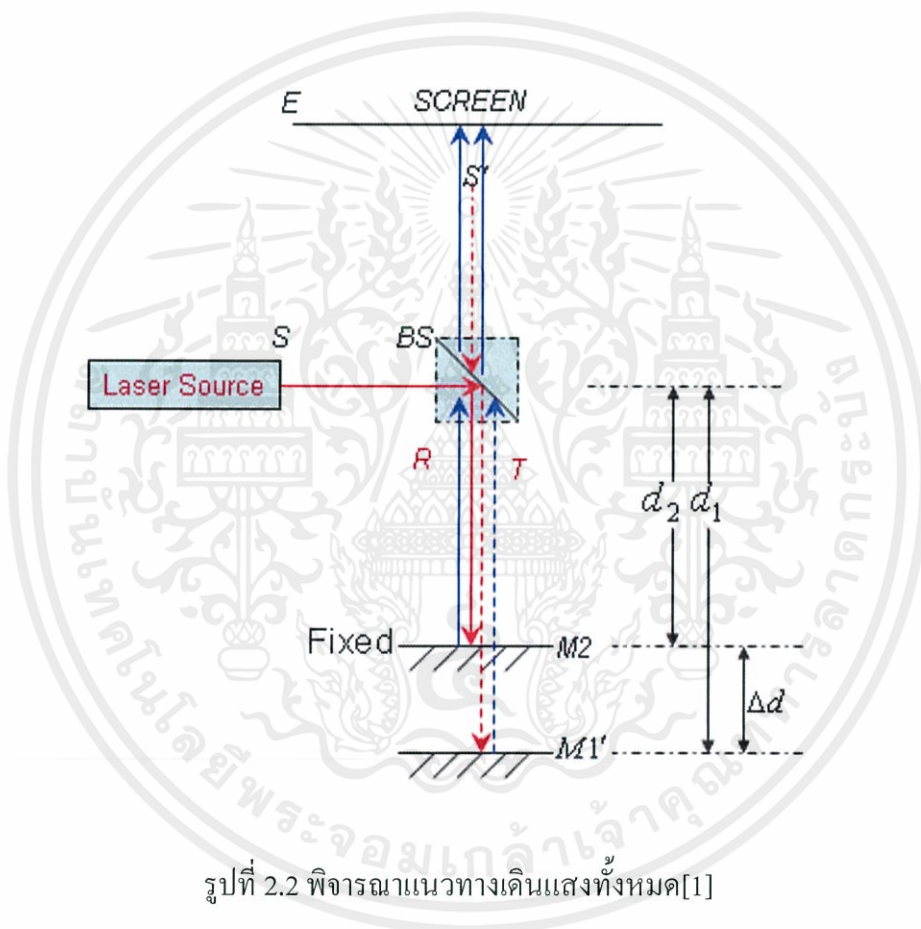
จากแหล่งกำเนิดแสงโคฮีเรนต์เดียวกันลำแสงจะถูกแยกออกเป็นแสงสองขบวน โดย BS (Beam Splitter) โดยปกติ ลำแสงส่วนหนึ่งจะสะท้อน (Reflected-R) และอีกส่วนหนึ่งจะถูกส่งผ่าน (Transmitted-T) โดย Beam Splitter-BS กระบวนการแทรกสอดของแสงโดยหลักของไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ เป็นการแทรกสอดแบบแบ่งแอมพลิจูด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1 ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ [1]

ในหลักพื้นฐานของไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ รูปที่ 2.1 แหล่งกำเนิดแสง  $S$  จะถูกแบ่งลำแสง 50% โดย  $BS$  ที่วางขวาง 45 องศา กับลำแสง ลำแสงที่ถูกส่งผ่านจะเดินทางไปตามกระจกกระบอก  $M1$  และสะท้อนกลับมายัง  $BS$  และส่วนหนึ่งหักเหเป็นมุม 90 องศา ไปตกระบบบนฉาก  $E$  (แสงอีกส่วนหนึ่งจะส่งผ่านไปยังแหล่งกำเนิดแสง แต่เราจะไม่สนใจในกรณีนี้) ลำแสงจากแหล่งกำเนิด ส่วนที่สะท้อนจาก  $BS$  จะเดินทางไปตามกระจกกระบอก  $M2$  และจะสะท้อนกลับมาอีกครั้ง โดยกระจกแสงที่สะท้อนจากกระจกส่วนหนึ่งจะส่งผ่าน  $BS$  ไปตกระบบฉากที่จุด  $E$  (แสงอีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนไปยังแหล่งกำเนิดแสง แต่เราจะไม่สนใจในกรณีนี้) แสงทั้งสองขบวนที่ไปตกระบบฉากที่จุด  $E$  จะเกิดการแทรกสอดกันเป็นริ้วการแทรกสอดขึ้นที่ฉาก



รูปที่ 2.2 พิจารณาแนวทางการเดินทางแสงทั้งหมด[1]

จากรูปที่ 2.2 พิจารณาแนวทางการเดินทางแสงทั้งหมด ช่วยให้สามารถเข้าใจความแตกต่างของทางการเดินทางแสง เหมือนกับมองเข้าไปใน  $BS$  จากด้านเลเซอร์ แทนที่กระจก  $M1$  ด้วยภาพเสมือน (virtual image)  $M1'$  และแทนแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์  $S$  ด้วยแหล่งกำเนิดแสงเสมือน  $S'$  เมื่อมองเข้าไปใน  $BS$  ในตำแหน่งของ  $M2$  ริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้นมาจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน ที่เป็นผลจากการสะท้อน และความแตกต่างของระยะกระจก  $M2$  และ  $M1'$  แทนค่าความต่างของระยะห่างทั้งสอง ด้วย  $\Delta d$  สมมติให้  $M1$  เลื่อน ดังนั้นเมื่อเลื่อน  $M1$  จะทำให้ความแตกต่างระยะทางการเดินทางแสงระหว่างจุดที่รังสีสะท้อนจาก  $M1'$  และ  $M2$  เป็น  $2\Delta d$

สมมติว่ามีคลื่นสองขบวน

$$u_1 = U_1 e^{i\phi_1} \quad (2.1)$$

$$u_2 = U_2 e^{i\phi_2} \quad (2.2)$$

เคลื่อนที่มาซ้อนทับกัน (Overlap) จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะได้ผลรวมของสนามรวมเป็น

$$u = u_1 + u_2 \quad (2.3)$$

เนื่องจากความเข้มแสงเป็นปฏิภาคกับกำลังสองของแอมพลิจูด ดังนั้นจากสมการที่ (2.3) จะได้

$$I = |u|^2 = |u_1 + u_2|^2 \quad (2.4)$$

$$I = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (2.5)$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$

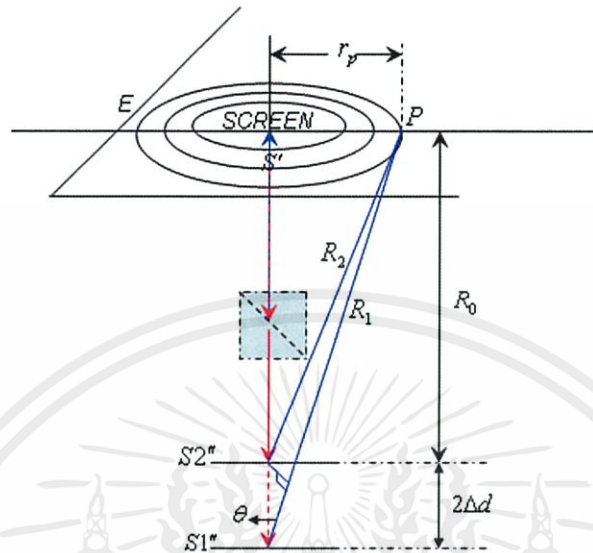
เนื่องจากไม่เกิดสั่นอินเตอร์เฟอริ่งนั้น เป็นการแทรกสอดแบบแบ่งแอมพลิจูด (Amplitude division) และ Beam Splitter ที่ใช้เป็นแบบแบ่งแสง 50:50 ดังนั้น  $I_1 = I_2$  ดังนั้น จากสมการที่ (2.6) จะได้

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (2.7)$$

สมการที่ (2.7) เป็นเทอมที่เราสนใจในการพิจารณาวิวัฒนาการแทรกสอดที่เกิดขึ้น

พิจารณาที่ 2.3 ลักษณะทางเรขาคณิตของวิวัฒนาการแทรกสอดวงกลมเกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นจุด เราเขียนให้อยู่ในระนาบเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นจากแหล่งกำเนิดแสง  $S$  แทนด้วยแหล่งกำเนิดแสงเสมือน  $S'$  ในรูปแบบที่สะท้อนใน BS การสะท้อนของ  $M1'$  จะได้  $S1''$  ในขณะที่การสะท้อนของ  $M2$  จะได้  $S2''$  ความแตกต่างระหว่างทางเดินแสง  $R1$  และ  $R2$  ของการแทรก

สอดทำให้เกิดริ้วการแทรกสอดวงกลมขึ้นในระนาบที่ฉาก  $E$  พิจารณาที่จุด  $P$  บนริ้วการแทรกสอดวงกลม



รูปที่ 2.3 รูปแบบของริ้วการแทรกสอดวงกลม[1]

$$(R_1 - R_2) = 2\Delta d \cos \theta \quad (2.8)$$

ที่จุดกลางของฉากจะเป็นริ้วสว่าง เมื่อความต่างระยะทางเดินแสงเป็นจำนวนเต็มของความยาวคลื่น เงื่อนไขสำหรับความเข้มแสงสูงสุดที่จุดกลางฉากเขียนเป็นความสัมพันธ์ดังสมการ

$$2\Delta d = \Delta m \lambda \quad (2.9)$$

เมื่อ  $m$  คือ อันดับของริ้วการแทรกสอด ดังนั้น

$$\Delta d = \frac{\Delta m \lambda}{2} \quad (2.10)$$

ถ้าระยะห่างระหว่าง  $M1'$  กับ  $M2$  เป็นระยะ  $\Delta d$  จะทำให้ริ้วการแทรกสอดที่จุดศูนย์กลางหดตัวเข้าหรือขยายตัวออกที่ละริ้วการแทรกสอด จะสามารถนับจำนวนริ้วการแทรกสอดได้ ถ้ากำหนดขีดอ้างอิงไว้โดยการนับจำนวนริ้วการแทรกสอดที่เปลี่ยนไป  $\Delta m$  ก็จะสามารถคำนวณหาระยะทางที่กระจกเลื่อนไปได้จากสมการที่ (2.10) โดยที่เราทราบค่าความยาวคลื่นที่แน่นอนของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้

## 2.3 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

กระบวนการกัดกร่อนของโลหะเป็นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยอิเล็กตรอนจะมีการถ่ายเทจากเคมีคอลสปีชีส์ (chemical species) หนึ่งไปยังอีกสปีชีส์หนึ่ง เราสามารถนำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีไปประยุกต์ใช้งานได้ยกตัวอย่างเช่น การกัด (etching) หรือ ใช้ในแบตเตอรี่แห้ง (dry-cell battery) เป็นต้น อะตอมของโลหะ M ที่มีการสูญเสียอิเล็กตรอน จะเรียกว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ



เมื่อ  $n$  คือจำนวนอิเล็กตรอนวงนอกสุด ยกตัวอย่างปฏิกิริยาเช่น



ตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเรียกว่า แอโนด (anode) หรือขั้วลบ จึงทำให้เราสามารถเรียก ปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อีกอย่างหนึ่งว่า ปฏิกิริยาแอโนดิก (anodic reaction)

อิเล็กตรอนที่ออกจากอะตอมโลหะตามสมการที่ 2.11 จะไปรวมกับอีกเคมีคอลสปีชีส์หนึ่ง เกิดเป็น ปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) ซึ่งในสภาวะต่างกัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น จะแตกต่างกันออกไป ในกรณีที่เป็นสารละลายกรด จะมีปริมาณของ  $H^+$  สูง  $H^+$  จะถูกรีดิวซ์ดังสมการ



ในกรณีสารละลายที่มีก๊าซออกซิเจนละลายอยู่ ปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดดังสมการ



ในกรณีสารละลายที่เป็นกลางหรือด่างที่มีก๊าซออกซิเจนละลายอยู่ ปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4(OH^-) \quad (2.15)$   
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่เป็น multivalent ion ปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดดังสมการ

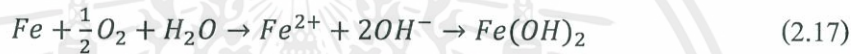


หรือ



บริเวณที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันจะเรียกว่า แคโทด (cathode) หรือขั้วบวก ในบางกรณีจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันหลายปฏิกิริยาได้พร้อมๆกัน โดยทั่วไปแล้ว ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีจะประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันอย่างน้อยอย่างละหนึ่งปฏิกิริยา เราเรียกแต่ละปฏิกิริยาย่อยนี้ว่า ครึ่งปฏิกิริยา (half-reaction) ซึ่งเมื่อรวมกันแล้ว อิเล็กตรอนทั้งหมดที่เกิดขึ้น จากปฏิกิริยาออกซิเดชันจะต้องถูกใช้หมดด้วยปฏิกิริยารีดักชัน

ยกตัวอย่างเช่น การเกิดสนิมเหล็ก ( $Fe(OH)_3$ ) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กที่อยู่ในน้ำที่มีก๊าซออกซิเจนละลายอยู่ โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นสองขั้นตอนดังสมการ



ผลที่ตามมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันคือ ไอออนของโลหะอาจจะอยู่ในรูปของไอออนในสารละลาย หรืออยู่ในรูปของสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ อย่าง  $Fe(OH)_3$

### 2.3.1 ประเภทของการกัดกร่อน

การกัดกร่อนสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆตามลักษณะทางกายภาพคือ การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (uniform corrosion) และการกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ (localised corrosion)

#### 2.3.1.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (uniform corrosion)

การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอเป็นการกัดกร่อนที่พบได้บ่อยที่สุด ยกตัวอย่างเช่น สนิมเหล็ก คราบดำบนเครื่องเงิน การกัดกร่อนแบบนี้จะเกิดอย่างสม่ำเสมอบนผิวของโลหะ และมักทิ้งรอยไว้ ซึ่งรอยดังกล่าวนี้สามารถป้องกันหรือว่ากำจัดได้ง่าย

#### 2.3.1.2 การกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ (localised corrosion)

การกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ คือการกัดกร่อนที่เกิดได้แค่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง มีด้วยกันหลายประเภท ดังนี้

##### 1) การกัดกร่อนกัลวานิก (galvanic corrosion)

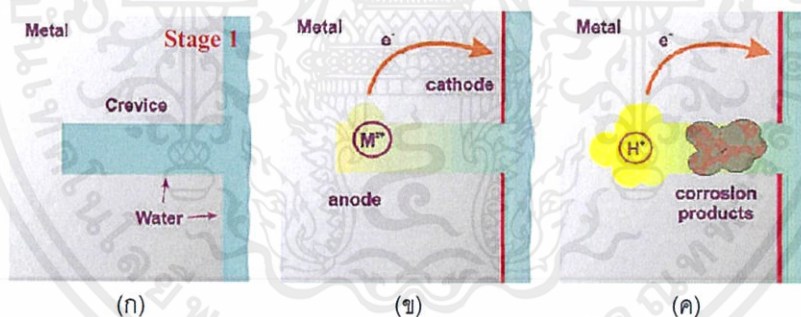
การกัดกร่อนกัลวานิก คือการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น โดยที่มีวัสดุตัวหนึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นขั้วลบให้กับระบบ ในขณะที่มีวัสดุอีกตัวหนึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นขั้วบวกให้กับระบบ ซึ่งทำให้เกิด

การกัดกร่อนเหมือนกับเซลล์กัลวานิก ยกตัวอย่างเช่น การถูกกัดกร่อนของสกรูเหล็กกล้าที่สัมผัสกับทองเหลืองในสภาวะแวดล้อมแบบน้ำทะเล หรือ การถูกกัดกร่อนของท่อเหล็กกล้าที่เชื่อมติดกับทองแดงในเครื่องทำน้ำร้อนในบ้าน

การป้องกันการกัดกร่อนแบบกัลวานิกสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น 1) เลือกใช้วัสดุที่อยู่ใกล้กันที่สุดใน galvanic series 2) ทำให้บริเวณแอโนดมีขนาดใหญ่ๆ เมื่อเทียบกับแคโทดเพื่อลดความสามารถในการเกิดออกซิเดชัน 3) เคลือบผิวด้วยฉนวนเพื่อป้องกันการสัมผัสกันของโลหะทั้งสอง หรือ 4) ทำให้เกิดเป็นแคโทดิก โพรเทคชั่น (cathodic protection)

## 2) การกัดกร่อนบริเวณซอก (crevice corrosion)

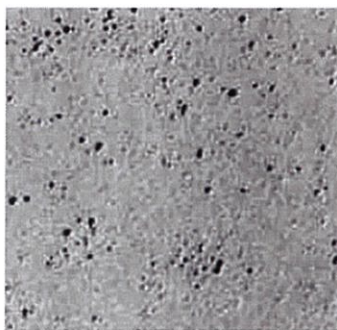
การกัดกร่อนบริเวณซอก เป็นการกัดกร่อนแบบที่เกิดเฉพาะที่เนื่องจากมีช่องเล็กๆ อยู่บนผิว มักเกิดบริเวณข้อต่อหรือรอยเคลือบ การกัดกร่อนประเภทนี้สามารถป้องกันได้โดยการเชื่อมต่อ (welding) เพื่อปกปิดบริเวณข้อต่อนั้น การกัดกร่อนบริเวณซอกสามารถแบ่งได้เป็นสามขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.4 และสามารถอธิบายได้ดังนี้ ขั้นที่ 1 (รูปที่ 2.4(ก)) ปริมาณออกซิเจนในน้ำมีอย่างทั่วถึง สม่่าเสมอ รวมทั้งบริเวณซอก ขั้นที่ 2 (รูปที่ 2.4(ข)) ออกซิเจนบริเวณด้านในซอกจะเริ่มหมด ทำให้กลายเป็นแอโนด โดยมีผิวด้านนอกทำหน้าที่เป็นแคโทด และชั้นสุดท้าย (รูปที่ 2.4(ค)) จะเกิด corrosion product สะสมอยู่ในบริเวณซอก



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการเกิดการกัดกร่อนบริเวณซอก[2]

## 3) การกัดกร่อนแบบหลุม (pitting corrosion)

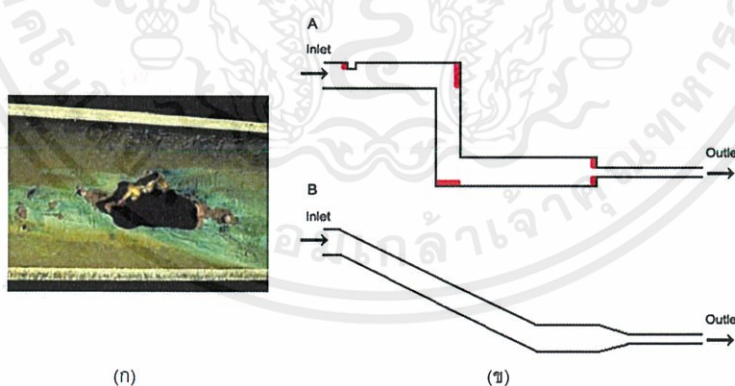
การกัดกร่อนแบบหลุม เป็นการกัดกร่อนที่มีลักษณะคล้ายกับการกัดกร่อนบริเวณซอก แต่จะเกิดบนผิวเรียบเป็นรูเล็กๆ บนผิวซึ่งสังเกตได้ยาก การกัดกร่อนแบบนี้จะมีการสูญเสียของเนื้อวัสดุต่ำ ยกตัวอย่างเช่น การแช่เหล็กกล้าไร้สนิมในน้ำทะเล วัสดุจะเกิดเป็นหลุมภายในเวลาเพียงไม่กี่สัปดาห์ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการทำให้เป็นโลหะผสม เช่น เติม Mo เข้าไปมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ หรือใช้ Pd-stabilized Ti เป็นต้น ตัวอย่างของการกัดกร่อนแบบหลุมแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การกัดกร่อนแบบหลุมบนผิวของโลหะ[2]

#### 4) การกัดกร่อนกัดเซาะ (erosion-corrosion)

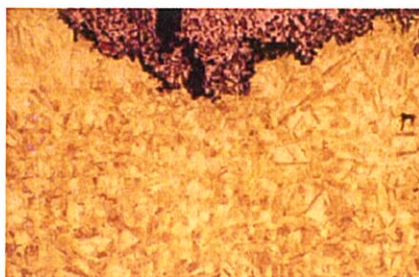
การกัดกร่อนกัดเซาะ เป็นกระบวนการร่วมกันระหว่างการกัดกร่อนกับการกัดเซาะซึ่งเกิดจากการไหลของของไหลในท่อ (ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ก)) โดยทั่วไปแล้ว ยิ่งของไหลมีอัตราเร็วมากจะยิ่งเพิ่มอัตราการกัดกร่อนกัดเซาะ นอกจากอัตราเร็วแล้ว การมีฟองอากาศในของไหลหรือมีอนุภาคหรือของแข็งแปลกปลอมใดๆในของไหล จะยิ่งเพิ่มอัตราการกัดกร่อนกัดเซาะให้เร็วยิ่งขึ้น อีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการกัดกร่อนกัดเซาะคือรูปแบบของท่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ข) จากรูปเห็นได้ว่าในกรณีที่ท่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบอย่างรวดเร็ว เช่น เป็นมุมฉาก (ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ขA)) จะสามารถพบบริเวณที่ถูกกัดกร่อนกัดเซาะได้หลายบริเวณ แต่ถ้ามีการปรับรูปร่างท่อให้มีมนน้อยลง (ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ขB)) จะสามารถลดอัตราการกัดกร่อนกัดเซาะได้มาก



รูปที่ 2.6 (ก) การกัดกร่อนกัดเซาะในท่อน้ำ (ข) กัดกร่อนกัดเซาะในท่อที่มีรูปร่างต่างกัน[2]

#### 5) การสูญเสียส่วนผสมบางตัว (selective leaching)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การกัดกร่อนประเภทนี้มักพบใน solid solution alloy ที่มี Al, Fe, Co, Cr, Ni เป็นองค์ประกอบ โดยมีชื่อเรียกตามธาตุที่ละลายออกมาก ยกตัวอย่างเช่น dezincification จะมีธาตุ Zn ละลายออกมาเป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กระบวนการ dezincification ในท่อทองเหลืองของระบบหล่อเย็น[2]

#### 6) การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (intergranular corrosion)

การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนมักเกิดขนานกับขอบเขตเกรนของอัลลอย ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการเชื่อมอัลลอย เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิสูง (500-800 องศาเซลเซียส) อาจทำให้โครเมียมและคาร์บอนในอัลลอยเกิดเป็น  $Cr_{23}C_6$  และทำให้เกิดเป็น Cr-deficient boundary บริเวณใกล้รอยเชื่อม (weld decay) เราสามารถป้องกันการกัดกร่อนแบบนี้ได้โดยนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน การใช้วัสดุที่มีคาร์บอนต่ำ หรือการเติมโลหะอื่นเช่น ไทเทเนียมเพื่อให้ไปทำปฏิกิริยาแทนโครเมียม เป็นต้น

#### 7) การกัดกร่อนความเค้น (stress corrosion)

กระบวนการกัดกร่อนความเค้น เป็นผลรวมของบรรยากาศกัดกร่อนกับความเค้นที่ให้กับวัสดุ วัสดุบางประเภทจะเริ่มถูกกัดกร่อนเมื่อมีแรงกระทำเท่านั้น แรงที่มากกระทำอาจเป็นแรงภายนอก หรือแรงที่เกิดจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อน วิธีป้องกันการกัดกร่อนความเค้นสามารถทำได้ โดยลดแรงที่มากกระทำ เพิ่มพื้นที่หน้าตัดที่ต้องรองรับแรง หรือนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อลดความเค้นสะสม

#### 8) การแตกร้าวจากไฮโดรเจน (hydrogen embrittlement)

การแตกร้าวจากไฮโดรเจนคล้ายกับการกัดกร่อนความเค้น แต่จะเกิดขึ้นเมื่อมีแหล่งของไฮโดรเจนอะตอม ยกตัวอย่างเช่น กระบวนการชุบด้วยไฟฟ้า (electroplating) การเชื่อมโลหะ หรือแม้กระทั่ง การหมักดอง โดยเริ่มต้นอะตอมของไฮโดรเจนจะแพร่เข้าไปยังผลึก หลังจากนั้น จะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบที่มีความเปราะ ซึ่งทำให้เกิดการเสียหายของชิ้นงานได้ง่ายขึ้น

## 2.4 อีเลียมเนียนเลเซอร์

เลเซอร์ (Laser) ย่อมาจาก Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation คืออุปกรณ์ที่ให้กำเนิดลำแสง ที่มีลักษณะเฉพาะ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่รวมกันระหว่างกลศาสตร์ควอนตัมกับอุณหพลศาสตร์ ซึ่งพลังงานแสงเลเซอร์ สามารถมีคุณสมบัติได้หลากหลาย ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการออกแบบ เลเซอร์ส่วนมากจะเป็นลำแสงที่มีขนาดเล็ก มีการเบี่ยงเบนน้อย (low-

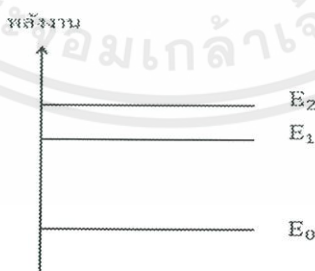
divergence beam) และสามารถระบุความยาวคลื่นได้ง่าย โดยดูจากสีของเลเซอร์ ถ้าอยู่ในสเปกตรัมที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (visible spectrum)

เลเซอร์ จะหมายรวมไปถึงการให้พลังงานผ่านตัวกลางเลเซอร์ (Laser Medium) ซึ่งตัวกลางอาจเป็นได้ทั้งของแข็ง ของเหลว ก๊าซ หรืออิเล็กตรอนอิสระที่มีคุณสมบัติสามารถนำแสงได้ในรูปแบบที่ง่ายที่สุด ออปติคัลคาวิตี (Optical cavity) จะประกอบไปด้วยกระจก 2 อัน ทำหน้าที่สะท้อนแสงผ่านตัวกลางเลเซอร์ โดยหนึ่งในกระจกนั้น (Output coupler) จะส่งลำแสงออกมา

ลำแสงเลเซอร์ ที่ผ่านทางตัวกลางเลเซอร์จะมีความยาวคลื่นเฉพาะ และมีพลังงานเพิ่ม ซึ่งกระจกนี้จะพยายามทำให้แสงส่วนมาก สามารถผ่านตัวกลางเลเซอร์ให้ได้ และออกมาเป็นลำแสงเลเซอร์ กระบวนการเหนี่ยวนำลำแสงเพื่อเพิ่มพลังงานนี้ จะใช้พลังงานไฟฟ้าหรือแสงในหลายความยาวคลื่น ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้ง ความยาวคลื่นของแสงในแต่ละความยาวคลื่น จะส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติ รูปร่าง และความยาวคลื่นของลำแสงเลเซอร์ที่สร้างออกมา

นักฟิสิกส์ได้เสนอแบบจำลองอะตอมว่าประกอบด้วยนิวเคลียสอยู่ตรงกลาง ซึ่งมีประจุบวก และมีอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ โคจรรอบ การอยู่หรือการจัดวางของอิเล็กตรอนในอะตอมทำให้อะตอม มีพลังงานค่าหนึ่ง ซึ่งอะตอมจะมีพลังงานได้เพียงบางค่าเท่านั้น (เรียกว่า quantized energy) ขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนและประจุบวกที่อยู่ในนิวเคลียสของอะตอมนั้นถ้าอะตอมได้รับพลังงานกระตุ้นที่เหมาะสม จะมีผลทำให้อะตอมมีพลังงานสูงขึ้น แต่โดยธรรมชาติแล้ว เมื่อเวลาผ่านไปอย่างรวดเร็ว อะตอมจะคายพลังงานส่วนเกินที่ได้รับออกมา เพื่อให้มีพลังงานต่ำลง

เนื่องจากอิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสในวงโคจรที่ต่างกัน จะมีพลังงานที่แตกต่างกัน ซึ่งพลังงานดังกล่าวบ่งชี้ถึงพลังงานของอะตอมนั่นเอง เมื่อทำการจัดเรียงพลังงานต่างๆ ของอะตอมที่สามารถมีได้ จากค่าน้อยไปหาค่ามาก สามารถเขียนแผนภาพชั้นพลังงาน (energy level) ของอะตอมได้ ดังรูป 2.8



รูป 2.8 แสดงชั้นพลังงานของอะตอม[3]

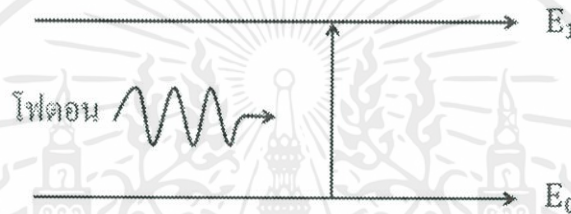
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกหนึ่งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมที่มีพลังงาน  $E_0$  เป็นอะตอมที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state) แต่ถ้าอะตอมที่มีพลังงานสูงขึ้นไป จะอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited states)

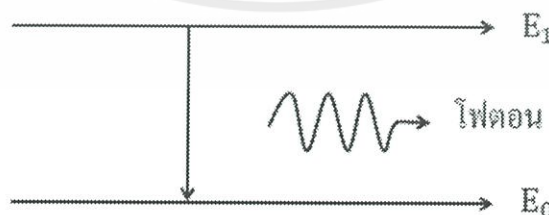
ในสภาวะสมดุลความร้อน เมื่อพิจารณาอะตอมหนึ่ง ๆ จะมีพลังงานอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งจะสามารถอยู่ในชั้นพลังงานใดชั้นพลังงานหนึ่งได้ แต่ในธรรมชาติ ธาตุและสารประกอบจะประกอบด้วยอะตอมจำนวนมาก ดังนั้นในชั้นพลังงานของอะตอมสำหรับธาตุหรือสารประกอบจึงมีอะตอมหรือประชากรอะตอมกระจายอยู่ในจำนวนที่แตกต่างกัน ซึ่งโดยมากแล้วประชากรอะตอมในชั้นพลังงานต่ำจะมีมากกว่าประชากรอะตอมในชั้นพลังงานสูง

การเปลี่ยนชั้นพลังงานของประชากรอะตอมสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีพลังงานจากภายนอกกระตุ้น เช่น การกระตุ้นโดยโฟตอนแสง (อนุภาคของแสง) ที่มีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานพอดี กล่าวคือ ถ้าต้องการกระตุ้นอะตอมที่อยู่ในสถานะพื้น ให้ไปอยู่ในสถานะกระตุ้นที่ 1 โฟตอนแสงที่ไปกระตุ้นต้องมีพลังงานเท่ากับขนาดของผลต่าง  $E_0 - E_1$



รูปที่ 2.9 การดูดกลืนแสง[3]

การเปลี่ยนชั้นพลังงานของอะตอมที่เกิดขึ้นโดยการดูดกลืนโฟตอนแสง เป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การดูดกลืนแสง (light absorption) แต่อะตอมที่อยู่ในชั้นพลังงาน  $E_1$  จะไม่เสถียร เมื่อเวลาผ่านไปอย่างรวดเร็ว อะตอมนั้นจะกลับมากอยู่ในชั้นพลังงาน  $E_0$  เช่นเดิม โดยปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของโฟตอนแสง ที่มีพลังงานเท่ากับ  $E_1 - E_0$  ปรากฏการณ์ปลดปล่อยโฟตอนโดยธรรมชาตินี้เรียกว่า การปล่อยแสงแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous emission)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.10 การปล่อยแสงแบบเกิดขึ้นเอง[3]

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี ค.ศ. 1917 ไอน์สไตน์ ได้เสนอว่า นอกเหนือจากปรากฏการณ์ปล่อยแสงแบบเกิดขึ้นเองแล้ว ยังสามารถทำให้เกิดการปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้น (spontaneous emission) ได้ด้วย ซึ่งการปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้นนี้เป็นกลไกหลักในการกำเนิดแสงเลเซอร์ กล่าวคือ ในขณะที่อะตอมอยู่ในสถานะกระตุ้น เช่น อยู่ในชั้นพลังงาน  $E_1$  ถ้ามีโฟตอนแสงจากภายนอกที่มีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงาน  $E_1 - E_0$  เข้ามาชน จะทำให้อะตอมที่อยู่ในชั้นพลังงาน  $E_1$  นี้ ถูกกระตุ้นให้ลงมายังชั้นพลังงาน  $E_0$  โดยมีการคายพลังงานออกมาในรูปโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับ  $E_1 - E_0$  เนื่องจากโฟตอนแสงที่มาชนไม่ถูกดูดกลืนโดยอะตอมที่ถูกชน ทำให้จำนวนโฟตอนเพิ่มขึ้นเป็นสองอนุภาค (โฟตอนที่มากระตุ้น บวกกับโฟตอนที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะของอะตอม) โฟตอนทั้งสองนี้มีพลังงานเท่ากัน มีความถี่เดียวกัน มีเฟสตรงกัน มีโพลาไรเซชันเหมือนกัน และเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน ซึ่งถ้าพิจารณาในมุมมองของคลื่นแล้ว จะพบว่าเมื่อแสงสองขบวนมีความถี่ตรงกัน มีเฟสตรงกัน เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันสามารถที่จะรวมกันในลักษณะที่เสริมกันได้ ทำให้ได้คลื่นรวมที่มีขนาดโตขึ้น เกิดเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การขยายสัญญาณแสง (light amplification) ขึ้น ถ้าสามารถทำให้เกิดการขยายสัญญาณแสงในลักษณะนี้กับอะตอมเป็นจำนวนมากๆ ได้ ก็จะทำให้ได้สัญญาณแสงที่มีความเข้มสูงออกมา

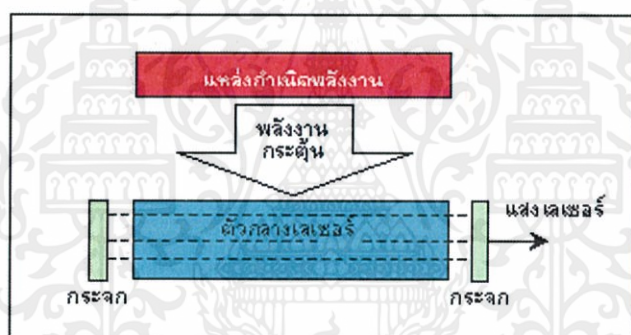
จากที่กล่าวมา พบว่าปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการที่จะทำให้เกิดการขยายแสงโดยการกระตุ้นได้มาก ๆ คือการทำให้มีประชากรอะตอมในสถานะกระตุ้นมาก ๆ ซึ่งในธรรมชาติเป็นไปได้ จึงต้องมีการหาวิธีการที่จะทำให้ประชากรอะตอมในสถานะกระตุ้น  $E_1$  มากกว่าสถานะพื้น  $E_0$  ปรากฏการณ์ที่ทำให้จำนวนประชากรอะตอมในชั้นพลังงานสูงมีมากกว่าประชากรในชั้นพลังงานต่ำ เรียกว่า ประชากรผกผัน (population inversion) ในทางปฏิบัติสามารถทำให้เกิดประชากรผกผันได้โดยการใช้พลังงานจากภายนอกปริมาณหนึ่งเพียงพอ จะทำให้อะตอมมีสถานะเปลี่ยนไปจากสถานะพื้น  $E_0$  ไปยังสถานะกระตุ้น  $E_1$  และทำให้การกระตุ้นประชากรอะตอมในสถานะกระตุ้นให้ตกกลับมายังสถานะพื้น เพื่อให้ประชากรอะตอมปลดปล่อยโฟตอนแสงเป็นจำนวนมากออกมา

อย่างไรก็ตามการกระตุ้นประชากรอะตอมเพื่อให้เกิดการปล่อยแสงเพียงครั้งเดียวยังไม่สามารถทำได้แสงเลเซอร์ออกมา เนื่องจากในความเป็นจริง ในขณะที่เดียวกับที่เกิดการปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้น ก็จะมีการดูดกลืนแสงเกิดขึ้นด้วยโดยประชากรอะตอมในสถานะพื้น ทำให้ความเข้มแสงที่ได้มีปริมาณลดลง ดังนั้นเพื่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเข้มของสัญญาณแสง จึงต้องทำให้เกิดปรากฏการณ์ปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้นอย่างต่อเนื่อง โดยการทำให้โฟตอนแสงที่ได้จากการปลดปล่อยของประชากรอะตอม มากระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยแบบถูกกระตุ้นซ้ำแล้วซ้ำอีก จนกระทั่งสัญญาณแสงมีความเข้มสูงขึ้นจนถึงจุดเลสซิง (lasing point) หรือจุดคออสซิลเลชันของเลเซอร์ (laser oscillating point) แสงที่ได้ออกมาจึงมีสมบัติเป็นแสงเลเซอร์

ด้วยสาเหตุที่แสงที่ได้นี้เกิดจากปรากฏการณ์ขยายสัญญาณโดยการปล่อยแสงแบบถูกกระตุ้น จึงเป็นที่มาของคำเต็ม laser ในภาษาอังกฤษที่มาจาก Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

เมื่อนำปัจจัยที่กล่าวมาทั้งหมดมาพิจารณา จะพบว่าในทางปฏิบัติ โครงสร้างของเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์จะต้องมีองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ

- **ตัวกลางเลเซอร์ (laser medium)** เป็นวัสดุที่ถูกกระตุ้นแล้วให้แสงเลเซอร์ออกมา ซึ่งอาจเป็นแก๊สของแข็ง ของเหลว หรือสารกึ่งตัวนำ
- **ออปติคัลเรโซเนเตอร์ (optical resonator)** เป็นส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดเลเซอร์ที่ทำให้เกิดการปล่อยแสงแบบถูกกระตุ้นซ้ำแล้วซ้ำอีกจนถึงจุดเลเซอร์ ซึ่งประกอบด้วยกระจก 2 แผ่น วางหันหน้าเข้าหากัน โดยระหว่างกลางมีตัวกลางเลเซอร์อยู่
- **แหล่งกำเนิดพลังงาน (energy source)** เป็นตัวกระตุ้นให้อะตอมอยู่ในสภาวะที่เป็นประชากรผกผัน



รูป 2.11 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดเลเซอร์[3]

กระจกที่ทำหน้าที่เป็นออปติคัลเรโซเนเตอร์สองบานนั้น มีความสามารถในการสะท้อนแสงได้ต่างกันเล็กน้อย กล่าวคือ กระจกแผ่นหลังตัวกลางเลเซอร์สามารถสะท้อนแสงได้หมด ในขณะที่กระจกแผ่นหน้าสะท้อนแสงได้เกือบหมด โดยมีปริมาณแสงบางส่วนทะลุผ่านไปได้ แสงที่ทะลุผ่านไปก็คือแสงเลเซอร์นั่นเอง

เลเซอร์มีคุณสมบัติดังนี้

- **มีทิศทางเดียวที่แน่นอน (Directionality)** ลำแสงเลเซอร์จะขนานกันไปตลอดระยะทางไกลๆ ไม่มีการบานออก ดังนั้นความเข้มของแสงเลเซอร์จะลดลงน้อยมากในระยะทางไกลๆ

- **เป็นแสงเอกรงค์ (Monochromaticity)** แสงเลเซอร์มีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว แหล่งกำเนิดแสงที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น หลอดไฟฟ้า และ ดวงอาทิตย์จะเป็นแสงสีขาว ถ้าให้แสงสีขาวผ่านปริซึม จะเห็นแถบสีต่างๆ เรียงกันอย่างต่อเนื่องจากสีม่วงถึงสีแดง เรียกว่า แถบ

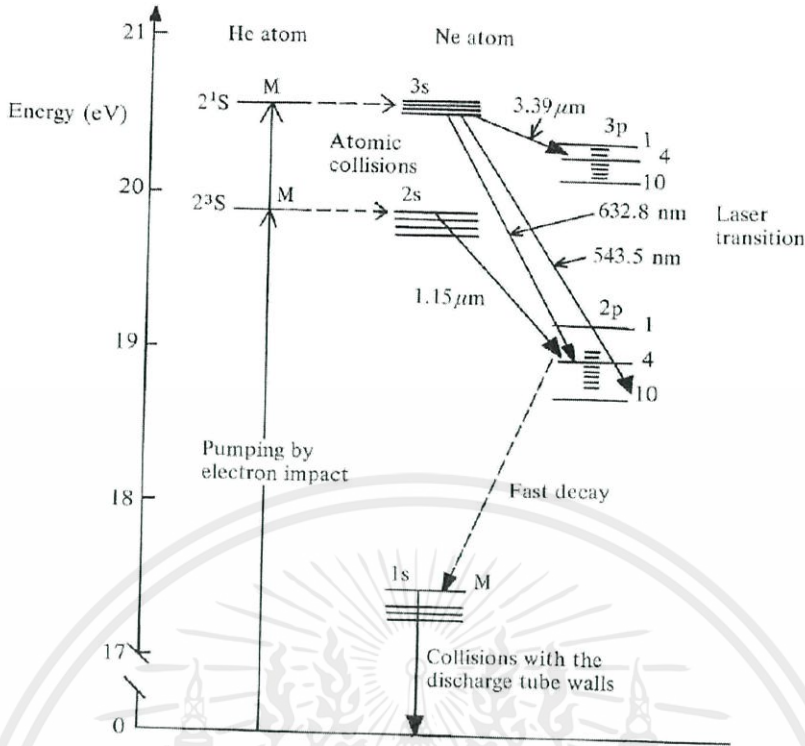
สเปกตรัมของแสงเลเซอร์ เช่น เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน เมื่อให้แสงสีแดงของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ผ่านปริซึม จะไม่มีการแยกเป็นหลายเส้นแต่ยังคงมีเพียง 1 เส้นที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร

- **มีความสว่างจ้า (Brightness)** แสงเลเซอร์มีลักษณะโดดเด่นไม่ซ้ำแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่น ในเชิงความเข้มสูง และเมื่อลำแสงตกกระทบวัตถุ ก็เกิดความระยิบระยับของลำแสงขึ้น (Laser Speckle) โดยเฉพาะเมื่อวัตถุนั้นมีความหยาบหรือแม้แต่ในบรรยากาศที่มีฝุ่นละอองหรือควันซึ่งเป็นอนุภาคแขวนลอยอยู่อย่างแรนดอม (random) ทั้งนี้เนื่องจากแสงเลเซอร์เกิดการสะท้อนแบบไม่มีทิศทางกับอนุภาค หรือผิวของวัตถุ และเกิดการแทรกสอดของลำแสง ทำให้เกิดความระยิบระยับขึ้นจึงเป็นมิติของการมองเห็น โดยใช้ Laser displays แสงเลเซอร์กำลังต่ำๆ เช่น ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์ ขนาด 1 มิลลิวัตต์ ก็มีความเข้มสูงกว่าแสงพระอาทิตย์ ฉะนั้นถ้าฉายเข้าตามนุษย์โดยตรงแล้ว จะเป็นอันตรายต่ออวัยวะตาถึงตาบอดได้

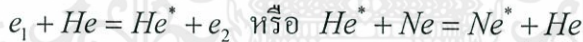
- **มีความเป็นโคฮีเรนต์ (coherence)** หลอดไฟฟ้าที่เปล่งแสงประกอบด้วยอะตอมที่เล็กจำนวนมาก โดยแต่ละอะตอมจะทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดแสง ดังนั้นแต่ละอะตอมก็ปล่อยแสงออกมาอย่างอิสระซึ่งกันและกัน แสงที่ถูกปล่อยออกมาจากหลอดไฟจึงมีเฟส และความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน ยิ่งกว่านั้นแต่ละคลื่นที่ถูกปล่อยออกมาไม่มีทิศทางไม่แน่นอน หรือเป็นแรนดอม (random) แสงจากแหล่งต้นกำเนิดแสงธรรมดาโดยทั่วไปจะเรียกว่า แสงอินโคฮีเรนต์ (incoherence light) ต้นกำเนิดของแสงเลเซอร์นอกจากจะให้แสงสีเดียวทุกๆ คลื่นของแสงเลเซอร์จะมีเฟสเดียวกันหมด ดังนั้นแสงเลเซอร์จึงเรียกว่า แสงโคฮีเรนต์ (coherence light)

ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์ แอทโทพีมีเดียเป็นส่วนผสมของฮีเลียม และนีออน ในอัตราส่วน 10 ส่วนของฮีเลียม ต่อ 1 ส่วนของนีออน ส่วนผสมของก๊าซทั้งสองจะบรรจุอยู่ในหลอดขนาดเล็กๆ เพียง 2-3 มิลลิเมตร โดยยาวตั้งแต่ 0.1 ถึง 1 เมตร มีความดันประมาณ 10 ทอร์ และทำการดิสชาร์จโดยมีสิ่งที่ควรระวังคือ ความต้านทานหลอดจะมีค่าน้อยมาก ฉะนั้นเมื่อเริ่มต้นการดิสชาร์จจะต้องใช้ความต้านทานภายนอกต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายกำลังเพื่อจำกัดกระแส

การเปลี่ยนสถานะให้แสงเลเซอร์เป็นการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอมนีออน มีการเปลี่ยนสถานะได้หลายแบบ โดยเริ่มต้นจากระดับพลังงาน 2 กลุ่ม ได้แก่ 3s และ 2s ดังแสดงในรูป 2.12 แต่การกระตุ้นด้วยอิเล็กตรอนไปยังระดับต่างๆ ไม่มีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องใช้ระดับกลางโดยอะตอมฮีเลียม มีระดับพลังงาน ( $2^1S$  และ  $2^3S$ ) ซึ่งมีระดับใกล้เคียงกับระดับ 3s และ 2s ของระดับพลังงานของนีออน นอกจากนี้ยังเกิดการกระตุ้นอย่างรวดเร็วระหว่างการดิสชาร์จ เมื่ออะตอมฮีเลียมที่ถูกกระตุ้นจะพบกับอะตอมนีออน ที่ยังไม่ถูกกระตุ้นอาจจะมีการถ่ายพลังงานให้แก่อะตอมนีออน ทำให้เกิดระดับพลังงานต่างๆของอะตอมนีออน ระดับพลังงานของอะตอมฮีเลียม และนีออน จะแตกต่างกันเล็กน้อย ทำให้มีการรับพลังงานจลน์ของอะตอมหลังจากมีการถ่ายพลังงาน เราอาจจะเขียนสมการแสดงกระบวนการกระตุ้นได้ดังนี้



รูป 2.12 ระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องของฮีเลียมนีออนเลเซอร์ M ระบุสถานะกึ่งเสถียร โดยที่  $e_1$  และ  $e_2$  เป็น พลังงานอิเล็กตรอนก่อนและหลังการชนกัน[3]



โดยที่  $e_1$  และ  $e_2$  เป็นพลังงานอิเล็กตรอนก่อนและหลังการชนกัน และอักษรดอกจัน หมายถึงอะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้น

จะมีการเปลี่ยนสถานะให้แสงเลเซอร์อยู่ 4 แบบ (ที่ 3.39 ไมโครเมตร, 1.15 ไมโครเมตร, 632.8 นาโนเมตร และ 543.5 นาโนเมตร) ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันไม่ว่าจะเริ่มต้นและสิ้นสุดในเวลาเดียวกัน การเปลี่ยนสถานะทั้ง 4 แบบจะสมบูรณ์อยู่ในตัวเอง จึงจำเป็นต้องมีการป้องกันแสงเลเซอร์ที่ความยาวคลื่นที่ไม่ต้องการออกไป โดยการกำหนดควาวิตีที่มีกระจกสะท้อนที่เหมาะสมสำหรับแสงเลเซอร์ที่ต้องการเท่านั้น

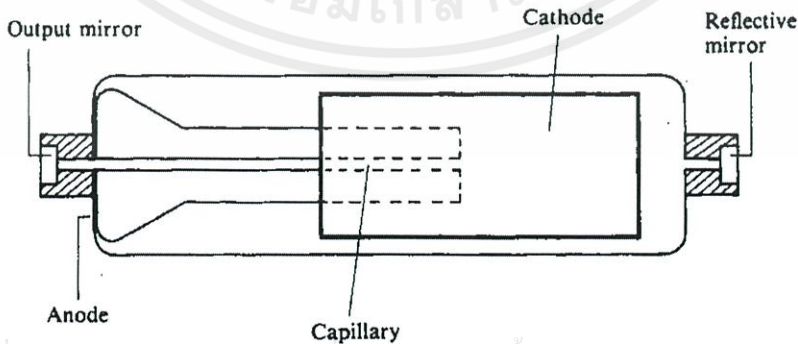
ฮีเลียมนีออนเลเซอร์ เป็นตัวอย่างของระบบเลเซอร์ 4 ระดับพลังงาน ดังนั้นเราต้องการให้ประชากรของการเปลี่ยนสถานะอยู่ในระดับพลังงานที่ต่ำที่สุด ซึ่งเท่ากับว่าอิเล็กตรอนในระดับสุดท้ายจะสลายตัวลงมาอยู่ที่สถานะเสถียร สำหรับอะตอมนีออน มีกระบวนการ 2 กระบวนการ ได้แก่ การเปลี่ยนสถานะ 2pมายัง 1s ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสถานะที่รวดเร็วมาก การเปลี่ยนสถานะที่ 2ได้แก่การเปลี่ยนสถานะจาก 1s ไปยังสถานะเสถียรซึ่งเกิดซ้ำมาก อัตราการเปลี่ยนสถานะแบบที่สองนี้จะมีการชนกันของอะตอมกับผนังของหลอดคิซซาร์จ ซึ่งพบว่าค่าเกณฑ์ของเลเซอร์จะ

แปรผกผันกับรัศมีของหลอด ด้วยเหตุนี้จึงต้องทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดเลเซอร์เล็กมากเท่าที่จะเป็นไปได้

การเปลี่ยนสถานะจาก 2p มายัง 1s เป็นที่น่าสนใจมากเพราะทำให้แสงสีเดียวกับแสงนีออน ดังนั้นระดับ 2p จะต้องมีการระดมมากโดยการดิสราร์จ แต่กรณีดังกล่าวไม่เป็นการดี เนื่องจากการเพิ่มประชากรในระดับ 2p จะทำให้เกิดการลดการผกผันประชากร (ในส่วนของเลเซอร์ ความยาวคลื่น 1.15 ไมโครเมตร, 632.8 นาโนเมตร และ 543.2 นาโนเมตร เกือบจะ) ผลกระทบได้แก่ การเกิดเลเซอร์จะหยุดเมื่อกระแสในหลอดสูง ดังนั้น เราไม่สามารถเพิ่มเอาต์พุตได้โดยการเพิ่มกระแสอย่างไม่จำกัด ดังนั้นการออกแบบฮีเลียมนีออนเลเซอร์จะออกแบบให้มีเอาต์พุตที่ต่ำๆ

ในบางกรณีเราสร้างฮีเลียมนีออนเลเซอร์ให้มีกระจกภายนอกติดที่ปลายของหลอดดิสราร์จ ทำให้เกิดออปติคัลควิตี้ การออกแบบดังกล่าวแสดงในรูป 2.15 ในรูปดังกล่าวหลอดแก้วทรงกระบอกอันนอกจะถูกระงับไว้ซึ่งติดอย่างถาวรในระบบ ปริมาตรเอกทิฟในการดิสราร์จได้แก่ หลอดแก้วเล็กๆที่ยาวตั้งแต่อาโนดไปยังปลายข้างที่เป็นแคโทด แคโทดทำจากโลหะผสมอะลูมิเนียมมีลักษณะเป็นหลอด การเปล่งอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นภายในหลอดนี้ มีหลายๆกระบวนการที่นับได้ว่าเป็นการเปล่ง รวมทั้งกระบวนการโฟโตอิเล็กทริกอีมิสชันและการทันเนลิ่ง (tunneling) ของอิเล็กตรอนผ่านชั้นออกไซด์ของผิว เป็นที่ชัดเจนว่ากระจกมีความแข็งแรงพอในการต่อต้านการลดระหว่างที่ถูกฉายด้วยการดิสราร์จ กระจกทั้งสองมักจะทำจากกลุ่มของซิลิเกตเยอร์ของไททาเนียมออกไซด์และซิลิกอนออกไซด์ที่มีความหนาเป็นหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น ถ้าต้องการเอาต์พุตที่เป็นแสงโพลาไรซ์เราก็ทำวินโดว์ให้เอียงเป็นมุมบรูว์สเตอร์

อย่างไรก็ดี ฮีเลียมนีออนเลเซอร์นี้จะให้เอาต์พุตกำลังต่ำอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 10 มิลลิวัตต์ สามารถใช้ทดแทนเลเซอร์ชนิดอื่นๆได้ เช่น กรณีไลน์วิคซ์แคบๆ และคุณภาพของแสงต้องดี นอกจากนี้ ฮีเลียมนีออนเลเซอร์ยังมีขนาดเล็กและเบาจึงสามารถหิ้วไปใช้งานที่อื่นๆได้

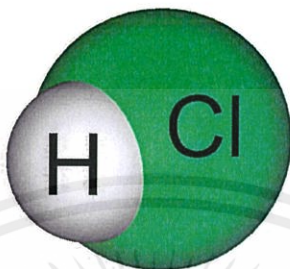


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.13 โครงสร้าง ฮีเลียมนีออนเลเซอร์ที่มีกระจกติด[3]

## 2.5 กรดเกลือหรือไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)

กรดเกลือหรือกรดไฮโดรคลอริกแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 เป็นสารประกอบเคมีประเภทกรดละลายในน้ำ โดยเป็นสารละลายไฮโดรเจนคลอไรด์ในน้ำ มีสูตรเคมีคือ HCl มีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งแก๊สและของเหลว



รูปที่ 2.14 แบบจำลองอะตอมของกรดไฮโดรคลอริก[11]

- ถ้าพบในรูปของเหลว เรียกว่า Hydrochloric acid (กรดเกลือ)

- ถ้ามีสถานะเป็นแก๊ส เรียกว่า Hydrogen chloride

กรดเกลือเป็นสารที่ไม่มีสี มีกลิ่นฉุน มีฤทธิ์ฟุ่กร่อนอย่างรุนแรง

กรดไฮโดรคลอริก ถูกค้นพบโดย จาเบียร์ เฮย์ยัน (Jabir ibn Hayyan) ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการผลิตสารประกอบอินทรีย์ เช่น ไวนิลคลอไรด์ สำหรับผลิตพีวีซี (PVC) พลาสติก และ MDI/TDI (Toluene Diisocyanate) สำหรับผลิตโพลียูรีเทน (Polyurethane) และใช้ในการผลิตขนาดเล็ก เช่น ผลิตเจลาติน ใช้ปรุงอาหาร ใช้ฟอกขาว

กรดเกลือในห้องปฏิบัติการใช้ในการผลิตสารประกอบคลอไรด์ และใช้ในการแยกแร่ให้บริสุทธิ์ เช่น แร่สังกะสี แทนทาลัม เป็นต้น และมักใช้กรดเกลือเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการผลิตภัณฑ์ประเภทน้ำยาล้างห้องน้ำ เพราะกรดเกลือมีคุณสมบัติในการกัดกร่อนคราบสกปรก ทำให้การทำมาความสะอาดสุขภัณฑ์ทำได้ง่าย

ในร่างกายมนุษย์ ในส่วนของกระเพาะอาหารมีกรดเกลือ ทำหน้าที่ช่วยในการทำงานของเอนไซม์เปปซิน เพื่อให้เกิดกระบวนการย่อยโปรตีนในกระเพาะอาหาร

กรดเกลือ จัดเป็นกรดแก่ เนื่องจากมีความสามารถในการแตกตัวได้ 100 % สามารถเขียนสมการแสดงการแตกตัวได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

หรือ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

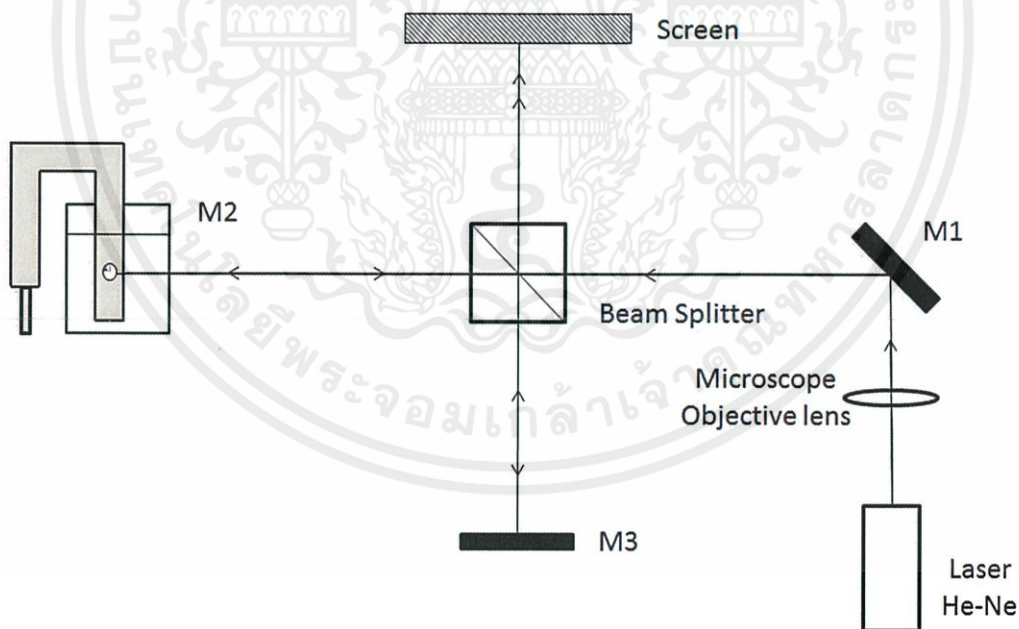
ในการทำการวัดการกักคร่อนในโลหะโดยใช้กระบวนการไม่เกิดสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ รายละเอียดส่วนต่างๆในการดำเนินโครงการมีดังนี้

### 3.1 การออกแบบระบบการวัดการกักคร่อนในโลหะ

ในการออกแบบการวัดการกักคร่อนในโลหะโดยใช้กระบวนการไม่เกิดสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์จะมีรายละเอียดของการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

#### 3.1.1 ศึกษาและออกแบบระบบการวัดการกักคร่อนในโลหะ

ในการศึกษาระบบการวัดการกักคร่อนในโลหะโดยใช้กระบวนการไม่เกิดสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการวัดความหนาของแผ่นโลหะที่เกิดการกักคร่อนซึ่งระบบไม่เกิดสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สำหรับการวัดการกักคร่อนในโลหะ แสดงไดอะแกรม ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบการวัดการกักคร่อนในโลหะโดยใช้กระบวนการไม่เกิดสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารจะถือว่าผิดกฎหมาย

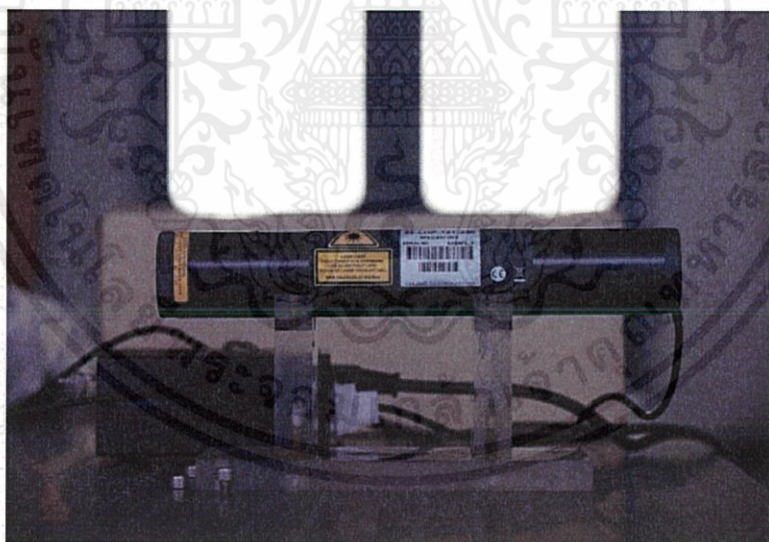
จากรูปที่ 3.1 แสดงจากแหล่งกำเนิดแสงฮีเลียมนีออน(He-Ne Laser) จะเดินทางเข้าสู่กระจก M1 แล้วเกิดการสะท้อนเข้าสู่ตัวกลางแยกลำแสง(Beam Splitter) ชนิด 50:50 ลำแสงจะแยก

ออกเป็น 2 ส่วนที่ตั้งฉากกัน โดยลำแสงส่วนที่ 1 เป็นลำแสงที่เกิดจากการส่งผ่านของตัวกลางแยก ลำแสงจะเดินทางไปยังกระจกเคลือบอะลูมิเนียม ซึ่งเราเปรียบเทียบกับเสมือนเป็นกระจก M2 และสะท้อนกลับมายังตัวกลางแยกลำแสง จากนั้นแสงจะเดินทางไปยังฉากรับภาพ(Screen) ลำแสงส่วนที่ 2 เป็นลำแสงที่เกิดจากการสะท้อนของตัวกลางแยกลำแสง โดยแสงจะเดินทางไปยังกระจก M3 และสะท้อนกลับมายังตัวกลางแยกลำแสงและแสงจะเดินทางไปยังฉากรับภาพเช่นกัน เนื่องจากลำแสงทั้งสองมีการเคลื่อนที่เป็นระยะทางที่ไม่เท่ากัน จึงทำให้ลำแสงทั้งสองเกิดการแทรกสอดกัน โดยมีเฟสต่างกันทำให้เกิดเป็นริ้วแถบมืดแถบสว่างที่ฉากรับแสง โดยการเปลี่ยนแปลงริ้วของการแทรกสอดจะเกิดขึ้นเมื่อแผ่นโลหะเกิดการกัดกร่อน เมื่อแผ่นโลหะเกิดการกัดกร่อนจะส่งผลให้กระจกเคลือบอะลูมิเนียมมีความหนาที่เปลี่ยนไป และเมื่อความหนาเปลี่ยนจะทำให้เกิดริ้วการแทรกสอดเปลี่ยนแปลง

### 3.1.2 การจัดระบบการวัดการกัดกร่อนในโลหะ

ในการจัดระบบไมโครสโคปอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สำหรับวัดการกัดกร่อนในแผ่น โลหะ จะต้องเตรียมอุปกรณ์ดังนี้

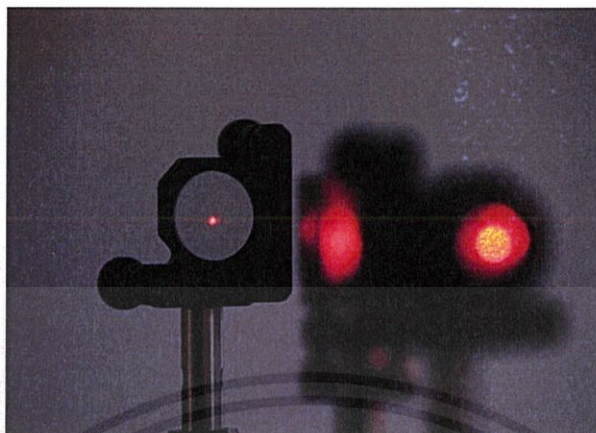
- แหล่งกำเนิดแสง (Light Source)



รูปที่ 3.2 แหล่งกำเนิดแสง

ในการทดลองจะทำการใช้เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสง เนื่องจากเลเซอร์มีคุณสมบัติที่มีความเป็นโคฮีเรนต์และมีทิศทางเดียวที่แน่นอน ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขและหลักการแทรกสอด ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีจุดเปล่งที่แน่นอน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกกรณีไปใช้ของแสง โดยในโครงการนี้จะใช้ฮีเลียมนีออนเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร กำลัง 1 มิลลิวัตต์

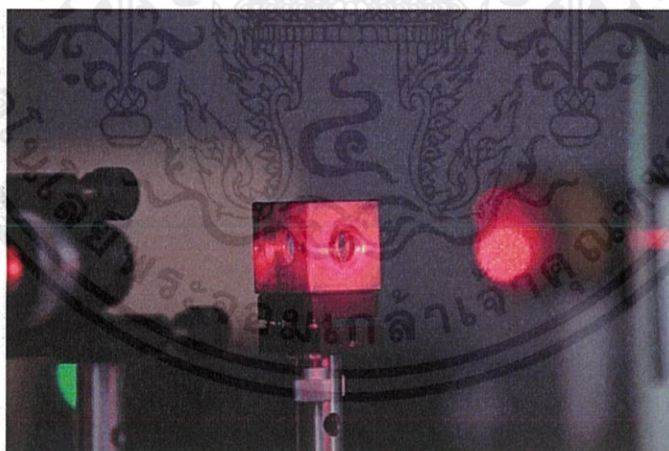
- กระจกสะท้อน (Mirrors)



รูปที่ 3.3 กระจกสะท้อน

กระจกสะท้อนเป็นตัวที่ใช้ในการสะท้อนลำแสงที่แยกออกจากกันจากตัวแยกลำแสงให้กลับมารวมกันที่ฉากรับแสง โดยจะใช้กระจกสะท้อน 2 ตัวด้วยกัน

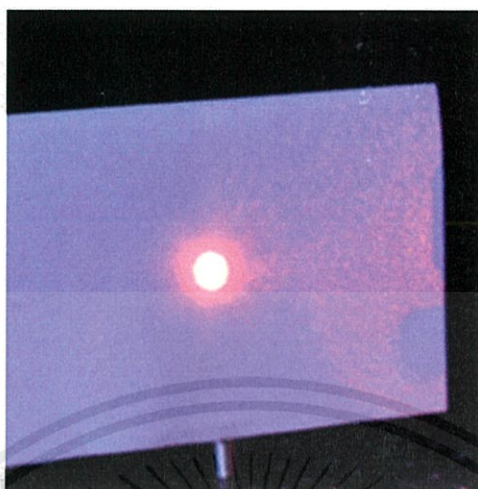
- ตัวกลางแยกลำแสง (Beam Splitter)



รูปที่ 3.4 ตัวกลางแยกลำแสง

ตัวกลางแยกลำแสงเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการแยกลำแสงเป็นลำแสงส่งผ่านและลำแสงสะท้อน ซึ่งความเข้มของลำแสงทั้งสองจะมีค่าเท่ากัน โดยตัวกลางแยกลำแสงจะมีหน้าที่ในการแยกลำแสงออกเป็น 2 ส่วน เพื่อทำให้ลำแสงทั้งสองเดินทางไปยังสะท้อนที่กระจกสะท้อนที่มีระยะทางที่แตกต่างกัน

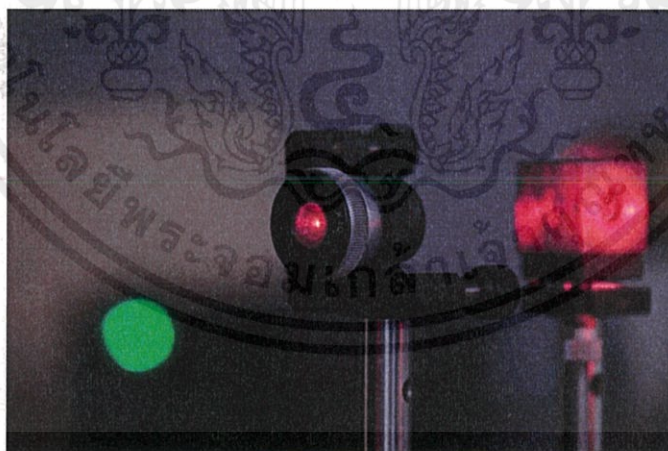
- ฉากรับภาพ (Screen)



รูปที่ 3.5 ฉากรับภาพ

ฉากรับภาพจะใช้ในการรับแสงที่เกิดจากการแทรกสอดกัน ซึ่งจะเกิดริ้วการแทรกสอดที่บริเวณนี้

- เลนส์ขยาย (Microscope Objective Lens)



รูปที่ 3.6 เลนส์ขยาย

เลนส์ขยายทำหน้าที่เป็นตัวขยายแสงจากการแทรกสอดกันของแสง เพื่อให้สามารถมองเห็นริ้วการแทรกสอดได้ชัดเจนส่งผลให้พิจารณาริ้วการแทรกสอดได้ง่ายยิ่งขึ้น โดยเป็นเลนส์ขยายที่มีการขยายเป็น 10 เท่า ของภาพจริง

- ตัวตรวจจับแสง (Photodetector) และเครื่องนับร็วการแทรกสอด (counter)



รูปที่ 3.7 ตัวตรวจจับแสงและเครื่องนับร็วการแทรกสอด

ตัวตรวจจับแสงเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่จะเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าและต่ออุปกรณ์เข้ากับเครื่องนับร็วการแทรกสอดซึ่งเครื่องนับร็วการแทรกสอดจะทำการนับร็วการแทรกสอดทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง

### 3.2 การทดสอบระบบการวัดการกักร่อนในโลหะ

เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์ให้เป็นระบบไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์สำหรับการวัดการกักร่อนในโลหะเรียบร้อยแล้ว ต่อไปจะทำการทดสอบระบบไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์เพื่อตรวจสอบว่าแสงเกิดการแทรกสอดกันจริง และเกิดร็วการแทรกสอดที่ฉากรับภาพก่อนจะนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดการกักร่อนในโลหะ โดยจะแบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้

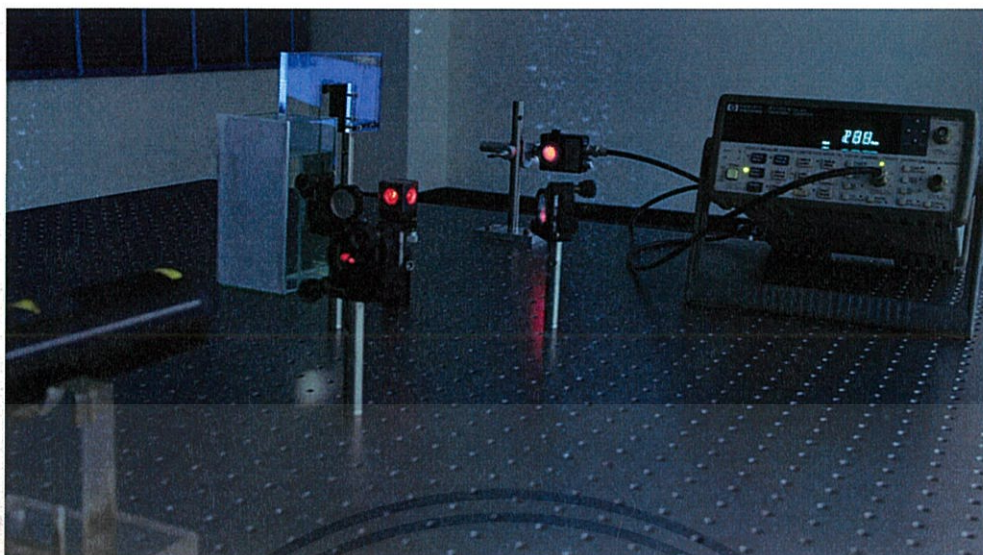
#### 3.2.1 ระบบไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์บริเวณโต๊ะลดการสั่นสะเทือนทางแสง (Optical Isolation Table) ดังรูปที่ 3.9 เพื่อลดการสั่นสะเทือนและทำการตรวจสอบความถูกต้อง เมื่อระยะเปลี่ยนร็วการแทรกสอดก็จะเปลี่ยนไปด้วย ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ร็วการแทรกสอดของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก... และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



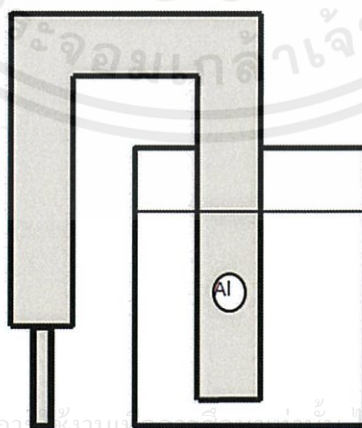
รูปที่ 3.9 การติดตั้งอุปกรณ์บริเวณโต๊ะลดการสั่นสะเทือนทางแสง

### 3.2.2 ระบบการวัดการกักกร่อนในโลหะ

ระบบการวัดการกักกร่อนสามารถทำได้โดยการเตรียมอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความลึกที่ถูกกักกร่อนของแผ่นโลหะได้จากสมการ

$$\Delta d = \frac{\Delta m \lambda}{2} \quad (3.1)$$

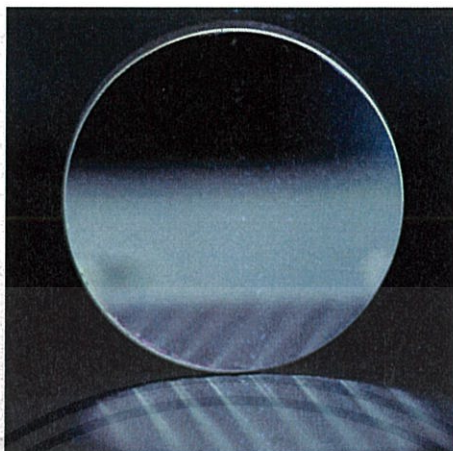
ซึ่งจากสมการเมื่อเราทราบจำนวนริ้วการแทรกสอดก็จะสามารถนำมาคำนวณความลึกที่ถูกกักกร่อนของแผ่นโลหะได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ที่ใช้ในการกักกร่อน โลหะ

- กระจกเคลือบอะลูมิเนียม



รูปที่ 3.11 กระจกเคลือบอะลูมิเนียม

โลหะที่จะนำมาใช้ในการทดลองเป็นกระจกเคลือบอะลูมิเนียม ซึ่งอะลูมิเนียมมีสัญลักษณ์ทางเคมีคือ Al โดยในโครงงานจะใช้กระจกที่ทำการเคลือบด้วยอะลูมิเนียม

- สารละลาย



รูปที่ 3.12 สารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารละลายที่ใช้ในการทดลองคือกรดไฮโดรคลอริกมีสูตรทางเคมีคือ HCl ซึ่งจะมีการคำนวณความเข้มข้นของสารละลายเป็นตัวกักร่อนโลหะ โดยการทดลองนี้จะใช้สารละลายที่มีความเข้มข้น 0.1, 0.2 และ

0.3 M

## บทที่ 4

### วิธีการทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 วิธีการทดลองและการวิเคราะห์การกักก่อนของอะลูมิเนียมที่ความเข้มข้นของสารละลายที่ต่างกันโดยใช้ไมโครสแกนอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

##### 4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ถูกกักก่อนของกระจกเคลือบอะลูมิเนียมและระยะเวลาในการกักก่อน

ในการทำการทดสอบหาความลึกที่ถูกกักก่อนของกระจกอะลูมิเนียมจะทำการทดลองโดยพิจารณาจากจำนวนริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงทุก 60 นาที จากความสัมพันธ์

$$\Delta d = \frac{\Delta m \lambda}{2} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $\Delta d$  คือ ความลึกที่ถูกกักก่อนของโลหะ

$\Delta m$  คือ อันดับของริ้วการแทรกสอด

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

##### 4.1.2 การวิเคราะห์ข้อมูลกราฟ

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ในทางฟิสิกส์จะมีลักษณะเป็นตาราง และทำการเขียนกราฟของข้อมูล จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัวแปรว่ามีรูปแบบของความสัมพันธ์เป็นอย่างไร

##### 4.1.3 การเตรียมความเข้มข้นของสารกักก่อน

การทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ปกติจะมีสารละลายเริ่มต้นซึ่งมีความเข้มข้นสูงและทราบค่าแน่นอนเตรียมไว้แล้ว บางครั้งต้องการใช้สารละลายชนิดเดียวกันแต่ความเข้มข้นต่ำกว่า จึงจำเป็นต้องทำให้เจือจางลงโดยการเพิ่มปริมาตรของตัวทำละลาย

ในการเจือจางสารละลายนั้นไม่ว่าสารตั้งต้นจะมีความเข้มข้นในหน่วยใดก็ตาม เมื่อทำการเจือจางแล้ว เนื้อสารหรือจำนวน โมลจะเท่ากับสารตั้งต้นที่แบ่งมาเพื่อทำการเจือจาง ซึ่งเขียนเป็นสมการที่จะใช้ในการคำนวณได้ดังนี้

$$C_1 V_1 = C_2 V_2 \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	C	เป็นความเข้มข้นในหน่วยใดก็ได้ แต่ $C_1$ และ $C_2$ ต้องมีหน่วยเหมือนกัน
	V	เป็นปริมาตรของสารละลาย
โดยให้	$C_1$	เป็นความเข้มข้นของ HCl ตั้งต้น
	$V_1$	เป็นปริมาตรของ HCl ตั้งต้นที่ต้องแบ่งมา
	$C_2$	เป็นความเข้มข้นของ HCl ที่เจือจางได้
	$V_2$	เป็นปริมาตรของ HCl ที่เจือจางได้

#### 4.1.4 การสอบเทียบเครื่องมือวัด

ในการทดลองจะทำการติดตั้งระบบไมเคลิสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ จากนั้นจะทำการสอบเทียบระบบโดยการติดตั้งอุปกรณ์ฐานเลื่อนด้วยไมโครมิเตอร์ที่กระจก M2 และทำการหมุนไมโครมิเตอร์ไปที่ 10-100 ไมโครเมตร รีวการแทรกสอดตรงกลางจะเปลี่ยนจากสว่างเป็นมืดหรือมืดเป็นสว่าง สัญญาณจากตัววัดความเข้มแสงจะทำให้เครื่องนับรีวการแทรกสอดนับเพิ่มขึ้น 1 และจะเพิ่มขึ้นทีละ 1 เมื่อกระจกเกิดการเลื่อน ซึ่งเรานำค่าที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนในการวัดได้

ค่าเฉลี่ยของการวัดระยะทาง n ครั้ง คือ

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4.4)$$

ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation , S.D) คือ

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (4.5)$$

ค่าความไม่แน่นอนในการวัด (Uncertainty or standard error of mean) คือ

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.6)$$

ค่าที่ได้จากการวัด n ครั้ง คือ  $\bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}}$

เอกสาร 4.2 ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดโดยการใช้ไมโครมิเตอร์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดโดยการใช้ไมโครมิเตอร์มาติดตั้งบริเวณกระจก M2 จากนั้นหมุนไมโครมิเตอร์ไปที่ 10-100 ไมโครเมตร ซึ่งจะทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง

ตารางที่ 4.1 ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดโดยใช้ไมโครมิเตอร์

ช่วง 10-100 ( $\mu\text{m}$ )	นับ ครั้งที่ ที่ 1	นับ ครั้งที่ 2	นับ ครั้งที่ 3	ระยะ ครั้งที่ 1 ( $\mu\text{m}$ )	ระยะ ครั้งที่ 2 ( $\mu\text{m}$ )	ระยะ ครั้งที่ 3 ( $\mu\text{m}$ )	ระยะ เฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	Standard deviation	uncertainty
10	31	33	31	9.8084	10.4412	9.8084	10.0193	0.2983	0.1722
20	63	64	62	19.9332	20.2496	19.6168	19.9332	0.2583	0.1492
30	94	95	94	29.7416	30.0580	29.7416	29.8471	0.1492	0.0861
40	126	125	127	39.8664	39.5500	40.1828	39.8664	0.2583	0.1492
50	158	159	158	49.9912	50.3076	49.9912	50.0967	0.1492	0.0861
60	189	191	190	59.7996	60.4324	60.1160	60.1160	0.2583	0.1492
70	221	221	220	69.9244	69.9244	69.6080	69.8189	0.1492	0.0861
80	252	253	252	79.7328	80.0492	79.7328	79.8383	0.1492	0.0861
90	284	285	284	89.8576	90.1740	89.8576	89.9631	0.1492	0.0861
100	316	315	317	99.9824	99.6660	100.2988	99.9824	0.2583	0.1492


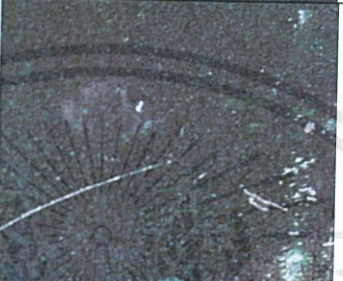

ตารางที่ 4.1 จะได้ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานและนำค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานมาใช้ในการคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนในการวัด ซึ่งค่าที่ได้มีค่าน้อยมาก ดังนั้นเครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถนำไปวัดการกัดกร่อนได้แน่นอน

#### 4.3 ผลการทดสอบความเหมาะสมของสารละลายที่จะนำมาใช้ในการทดลองที่ความเข้มข้นต่างๆ

ทำการเตรียมสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้น 0.1 , 0.2 และ 0.3 M จากนั้นนำโลหะอะลูมิเนียมที่เตรียมไว้ไปจุ่มลงในสารละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การทดสอบสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของสารละลาย (M)	โลหะอะลูมิเนียมที่เกิดการกัดกร่อน
0.1	
0.2	
0.3	

จากตารางที่ 4.2 เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง จะพบว่าที่ความเข้มข้น 0.1 M จะเกิดการกัดกร่อนน้อยมากซึ่งไม่สามารถนำมาใช้ในการทดลองได้ เนื่องจากจะใช้เวลาในการทดลองเพียง 8 ชั่วโมง จึงต้องใช้ความเข้มข้น 0.3 M เพราะเกิดการกัดกร่อนมากที่สุด

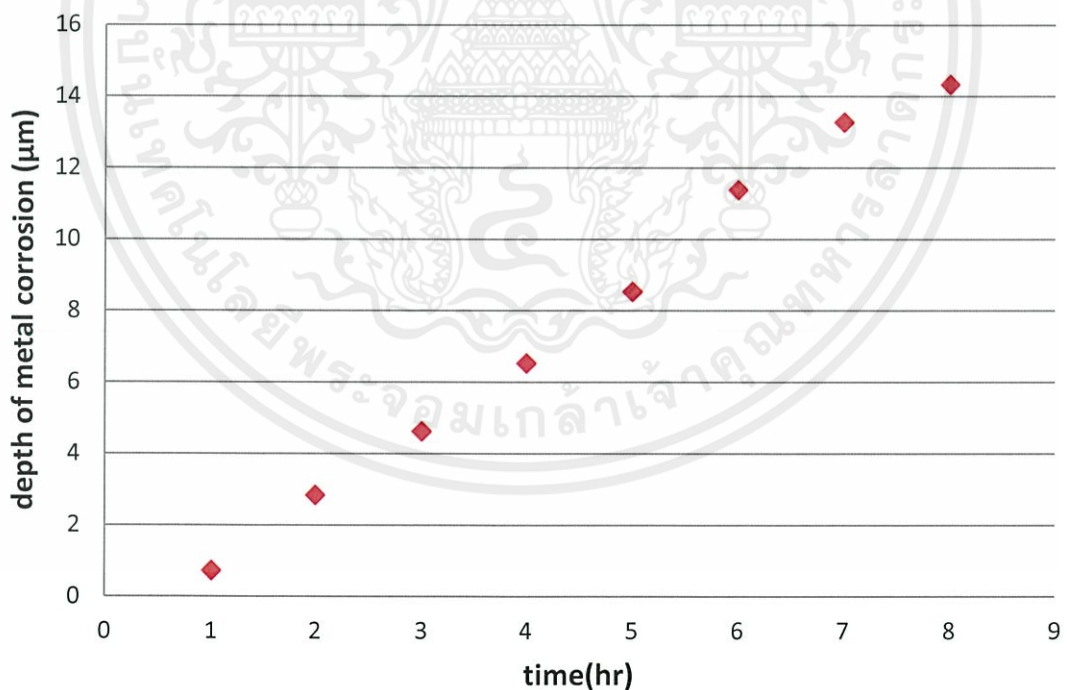
#### 4.4 ผลการทดลองการกัดกร่อนของกระจกเคลือบอะลูมิเนียม

ในการทดลองจะใช้สารละลาย HCl ที่ความเข้มข้น 0.3 M จากนั้นจะนำกระจกเคลือบอะลูมิเนียมจุ่มในสารละลายเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งจะทำการนับจำนวนริ้วที่เกิดขึ้นทุกๆ 1 ชั่วโมง โดยจะทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การกั้ดกร่อนของกระจกเคลือบอะลูมิเนียม

เวลา (ชั่วโมง)	จำนวน รีวการ แทรก	จำนวน รีวการ แทรก	จำนวน รีวการ แทรก	ความ ลึกที่ถูก กัด	ความ ลึกที่ถูก กัด	ความ ลึกที่ถูก กัด	ความ ลึกที่ถูก กัด	Standard deviation	Uncertainty
	สอด ครั้งที่ 1	สอด ครั้งที่ 2	สอด ครั้งที่ 3	กร่อน ครั้งที่ 1 ( $\mu\text{m}$ )	กร่อน ครั้งที่ 2 ( $\mu\text{m}$ )	กร่อน ครั้งที่ 3 ( $\mu\text{m}$ )	เฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )		
1	2	3	2	0.6328	0.9492	0.6328	0.7383	0.1492	0.0861
2	10	8	9	3.164	2.5312	2.8476	2.8476	0.2583	0.1492
3	15	14	15	4.746	4.4296	4.746	4.6405	0.1492	0.0861
4	20	21	21	6.328	6.6444	6.6444	6.5389	0.1492	0.0861
5	28	26	27	8.8592	8.2264	8.5428	8.5428	0.2583	0.1492
6	36	35	37	11.3904	11.074	11.7068	11.3904	0.2583	0.1492
7	42	43	41	13.2888	13.6052	12.9724	13.2888	0.2583	0.1492
8	45	46	45	14.238	14.5544	14.238	14.3435	0.1492	0.0861





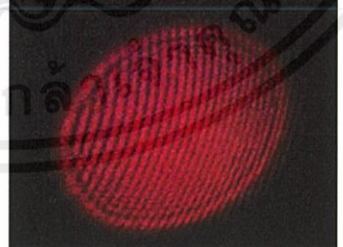
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ข้อมูลใดๆที่ปรากฏในเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต

จากรูปที่4.1 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ถูกกัดกร่อนกับระยะเวลาในการกัดกร่อน โดยจะมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดประมาณ  $0.09 \mu\text{m}$  ซึ่งกราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรง การทดลองนี้ใช้เวลาเพียง 8 ชั่วโมง เนื่องจากสารอะลูมิเนียมที่ใช้เคลือบกระจกหลุดออกมาจึงไม่สามารถทดลองต่อไปได้ แต่จากทฤษฎีเมื่อเวลามากกว่า 10 ชั่วโมง แนวโน้มของเส้นกราฟจะเป็นแบบลอการิทึม[12]

#### 4.5 ผลการตรวจสอบการกัดกร่อนของกระจกเคลือบอะลูมิเนียม

ในการทดลองจะทำการแช่กระจกเคลือบอะลูมิเนียมลงในสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้น 0.3 M และทำการตรวจสอบวิธีการแทรกสอดเป็นเวลา 15 ชั่วโมง

ตารางที่4.4 การตรวจสอบการกัดกร่อนของกระจกเคลือบอะลูมิเนียม

เวลา (ชั่วโมง)	วิธีการแทรกสอด
0	
6	
15	

จากตารางที่4.4 จะพบว่าวิธีการแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งวิธีการแทรกสอดเพิ่มขึ้นแสดงว่าระยะทางเดินแสงมีการเปลี่ยนแปลง จึงพิสูจน์ได้ว่ากระจกเคลือบอะลูมิเนียมเกิดการกัดกร่อนจริง การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะสรุปผลการทดลองจากการวัดการกักร่อนในโลหะ โดยใช้กระบวนการไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การวัดการกักร่อนในโลหะ โดยใช้กระบวนการไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์เป็นการใช้กระจกเคลือบอะลูมิเนียมมาจุ่มในสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้น 0.3 M โดยผลการทดลองที่ได้จากการกักร่อนอะลูมิเนียมในสารละลายจะเป็นกราฟเส้นตรงเนื่องจากทำการทดลองได้เพียง 8 ชั่วโมง แต่จากทฤษฎีของการกักร่อนเมื่อเวลามากกว่า 10 ชั่วโมง กราฟจะมีแนวโน้มเป็นแบบลอการิทึม เนื่องจากเป็นการกักร่อนที่ชั้นผิวบางๆ[12] เมื่อนำค่าความลึกของกระจกอะลูมิเนียมที่ถูกละลายกักร่อนมาคำนวณหาความไม่แน่นอนในการวัดพบว่ามีค่าประมาณ 0.09  $\mu\text{m}$  ซึ่งมิต่ำน้อยมาก จึงสรุปได้ว่าผลการทดลองมีแนวโน้มที่เป็นไปตามทฤษฎีการกักร่อนของโลหะ

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดลองควรทำการทดลองในห้องที่มีดพอสสมควร เพราะอาจทำให้เกิดแสงรบกวนสัญญาณในการวัด
2. ก่อนทำการทดลองควรทำการจัดแนวแสงให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าวัดที่แน่นอน
3. ในการทดลองควรใช้ภาชนะใส่สารละลายที่ใสและเรียบ เพื่อลดการสะท้อนของแสงและให้เลเซอร์ทะลุผ่านได้

#### 5.3 แนวทางพัฒนา

พัฒนาให้ใช้แผ่นอะลูมิเนียมที่ทำการขัดจนเรียบและเงาแทนกระจกเคลือบอะลูมิเนียม เนื่องจากกระจกเคลือบอะลูมิเนียมราคาค่อนข้างสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] วิโรจน์ สุदारธรรม. (ม.ป.ป.). *ไมเคลิสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (หน้า 1-4)*. กรุงเทพฯ: เกษมบัณฑิตมหาวิทยาลัย.
- [2] สุภาสิณี ลิ้มปานภาพ. (ม.ป.ป.). *การกัดกร่อนและการเสื่อมสลายของวัสดุ (หน้า 217-228)*. (ม.ป.พ.).
- [3] สุรพล รักวิชัย. (ผู้แปล). (2544). *เลเซอร์: ทฤษฎีและการประยุกต์*. เขียนโดย วิลสัน เจ, และฮอว์เกส เจ. เอฟ. บี. กรุงเทพฯ: เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโคไชน่า.
- [4] [Online]. Available : [http://www.promma.ac.th/main/chemistry/web\\_electrochemistry/Electrochemistry01.htm](http://www.promma.ac.th/main/chemistry/web_electrochemistry/Electrochemistry01.htm)
- [5] [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/electrochemistry/web/electrochem05.htm>
- [6] [Online]. Available : <http://www.thaigoodview.com/node/17983>
- [7] [Online]. Available : [http://www.myfirstbrain.com/student\\_view.aspx?ID=74348](http://www.myfirstbrain.com/student_view.aspx?ID=74348)
- [9] [Online]. Available : <http://pirun.ku.ac.th/~fsciwr/index.html>
- [10] [Online]. Available : <http://www.mmv.ac.th/supphapong/sci%20613.htm>
- [11] [Online]. Available : <http://www.sahavicha.com/?name=media&file=readmedia&id=1122>
- [12] D. Mayorga-Cruz ,P.A. Ma´rquez-Aguilar, O. Sarmiento-Marti´nez and J. Uruchurtu-Chavari´n. **Evaluation of corrosion in electrochemical systems using Michelson Interferometry**, Optics and Lasers in Engineering 45 (2007) : 140–144.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## Evaluation of corrosion in electrochemical systems using Michelson interferometry

D. Mayorga-Cruz\*, P.A. Márquez-Aguilar, O. Sarmiento-Martínez, J. Uruchurtu-Chavarrín

*Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, CIICAp. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, UAEM. Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, C.P. 62209, Cuernavaca, Morelos, Mexico*

Received 26 September 2005; received in revised form 27 January 2006; accepted 6 February 2006  
Available online 18 April 2006

### Abstract

This work presents the performance of a simple Michelson interferometric configuration, allowing monitoring and evaluation of corrosion and oxide layer growth in aluminium during aqueous corrosion processes in a distilled water solution, without any physical contact with the sample. This alternative experimental arrangement introduces a simpler alignment compared with a preliminary proposal [Habib K. In situ measurement of oxide film growth on aluminium samples by holographic interferometry. *Corrosion Sci* 2001; 43, 449–55], and the obtained interferograms offer a qualitative and possibly quantitative evaluation of an important physical parameter related to the corrosion process kinetics. Interferograms were obtained as a function of time to register changes related to the corrosion dynamics and oxide growth process. Experimental results correlate with the well-known corrosion process taking place over the aluminium sample under these experimental conditions.

© 2006 Elsevier Ltd. All rights reserved.

**Keywords:** Optical monitoring; Interferometry; Corrosion

### 1. Introduction

Corrosion process is in fact, the general cause of alteration and/or destruction of most of the metallic materials and structures used by men through the action of an electrochemical phenomenon. Electrochemical corrosion is a spontaneous process denoting the existence of an anodic area (where corrosion takes action), a cathodic area and an electrolyte, being both anodic and cathodic areas in electrical contact [1]. The presence of these elements is essential for the existence of corrosion, as a result of the formation of several anodic and cathodic areas over the metallic surface.

### 2. Corrosion measurement

Of particular practical interest is the estimation of the resistance of any particular metal or alloy to corrosion under a specific environment. Through laboratory tests, it

is possible to set basic physical conditions in order to study and monitor the performance of several metals in such environments.

Corrosion monitoring may be defined as the systematic measurement of the corrosion or degradation of an item of equipment, with the objective of assisting in the understanding of the corrosion process and/or obtaining information to use in controlling corrosion and its consequences, and in the interrelation between corrosion processes and operational variables.

Traditionally, the evaluation of the corrosion rate in a metal is carried out by its weight-loss measurement; this method consists in determining how much of the physical weight of metal is lost when immersed in a corrosive solution after a certain period of time. On the other hand, and due to the evidently electrochemical nature of corrosion processes (specially at normal temperature below 100 °C), modern electrochemical methods have been developed to investigate metallic corrosion, and consequently to measure corrosion kinetics [1]. However under these circumstances, it is necessary to make direct physical contact with the metallic sample under investigation and

\*Corresponding author. Tel./fax: +521 777 3 29 70 84.

E-mail address: [darwin@uaem.mx](mailto:darwin@uaem.mx) (D. Mayorga-Cruz).

sometimes this is not possible or adequate. This apparently insignificant detail becomes extremely important when it is necessary to carry out measurements of corrosion in situ, such as industrial environments and under very different physical conditions as compared to laboratory conditions.

For this reason it is important to investigate and develop other alternatives to traditional intrusive methods for metallic corrosion evaluation, like optical non-destructive technologies. One of the most well-known optical techniques due to its capabilities for applications in metrology is holographic interferometry. Such method allows detection and measuring of microscopic changes over metallic surfaces below the micron range [2]. The technique is widely accepted because it is a non-destructive one, and can detect surface alterations in the order of  $\lambda/2$ , being  $\lambda$  the used laser source wavelength.

Previously, Habib has developed holographic interferometric-based methods for stress-assisted electrochemical corrosion behaviour monitoring, as stress fracture corrosion or fatigue corrosion among others using a basic experimental set-up [3]. A mathematical model describing cathodic deposition and anodic dissolution in metals by holographic interferometry was proposed [4,5]. Additionally, the technique has been used to develop a corrosion optical transducer, applied as an example in metallic alloy corrosion processes when immersed in aqueous solutions and its control using organic protective coatings, without any physical contact [6,7]. These are examples of the potentiality of interferometry-based techniques in electrochemical fields which can be continually developed.

In this work a simpler experimental set-up is proposed obtaining good results as compared to more cumbersome arrangements previously reported by Habib [1–5].

### 3. Michelson interferometry for corrosion

Let us consider an arbitrary point  $P$  on a metallic surface before it is exposed to a corrosive solution. After immersion in the presence of an anodic reaction, the point is displaced to a secondary point  $P'$  (Fig. 1). This scheme is based on the typical Michelson Interferometer set-up, and is applied here for corrosion measurements. In order to measure the thickness of the metal layer lost or oxide growth during the reaction, and considering an orthogonal movement of point  $P$ , we can obtain according to Fig. 1:

$$OP = PO = D,$$

$$PP' = P'P = U = \text{orthogonal displacement.}$$

Consequently, the optical path length difference  $\Delta$  between both beams coming from  $P$  and  $P'$  points is

$$\begin{aligned} \Delta &= (OP + PP' + P'P + PO) - (OP + PO), \\ \Delta &= (D_1 + U + U + D_1) - (D_1 + D_1) = 2D_1 + 2U - 2D_1, \\ \Delta &= 2U. \end{aligned} \tag{1}$$

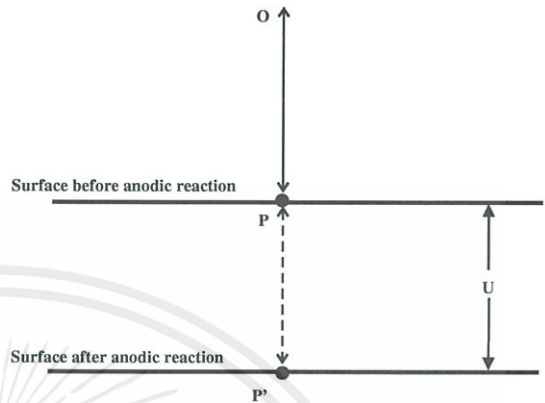


Fig. 1. Displacement of point  $P$  on an unreacted surface to point  $P'$  after the anodic dissolution reaction.

Now, for the observation of maximum intensity values of the interference fringe patterns formed, the phase difference  $\delta$  between two reflected beams must be equal to  $2\pi$  integer multiples. Then if we consider by simplicity that both beams before and after the anodic reaction travel across an aqueous media, with the refraction index remaining almost constant during the process, and also with normal illumination on both planes, such a phase difference can be written as

$$\delta = 2\pi N = \frac{2U \cdot 2\pi}{\lambda}, \tag{2}$$

where  $\lambda$  is the wavelength of the laser source and  $N$  is the number of fringes passing through  $P$ , defined as

$$N = \frac{\Delta}{\lambda} = \frac{2U}{\lambda}. \tag{3}$$

Directly from (2) and (3), an approximated expression can be obtained for the orthogonal displacement of point  $P$  in terms of  $N$

$$U_N = \frac{N\lambda}{2}, \tag{4}$$

and this is related to the metallic layer lost or oxide growth during the anodic reaction.

A comparison between the theoretical model presented by Habib in Ref. [5] and Eq. (4), suggests a correlation between them, if we consider normal illumination for a holographic interferometry set-up [5].

### 4. Experimental set-up

The metallic samples used in the experiments reported here are made of  $20 \times 20 \times 1.5$  mm commercial aluminium (99.9%) slabs, encapsulated into MC-40 commercial epoxy resin. Once the slab is encapsulated, the  $400 \text{ mm}^2$  exposed area is manually polished with emery paper (1000 SiC grit) to obtain mirror-like brightness, enough to allow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

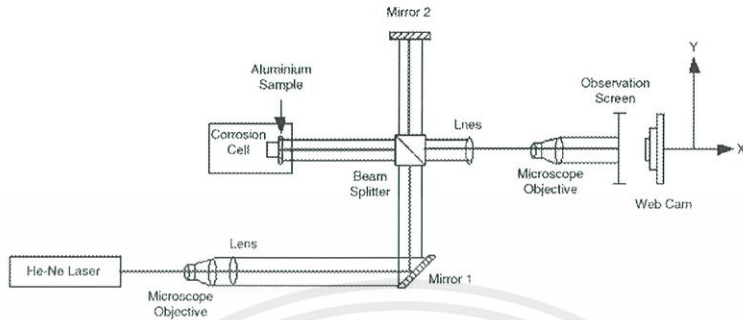


Fig. 2. Experimental set-up for corrosion monitoring by Michelson interferometry.

semi-specular reflection for visible light. The simpler experimental set-up consists of a Michelson interferometer (Fig. 2); a beam coming from a He-Ne laser with a  $P = 75$  mW output power and  $\lambda = 632.8$  nm wavelength, amplified to an approximated 10 mm diameter, by combining a  $40\times$  microscope objective and a biconvex lens with a focal distance  $f = 50$  mm. A 50/50 beam splitter separates the incoming light into two components, and as one of these beams is directed to a plane mirror in one of the interferometer arms, the other goes to a  $10 \times 10 \times 8$  cm<sup>3</sup> electrochemical glass cell set in the other arm. The metallic sample is fixed into the cell and this is filled with the aqueous electrolyte. The reference beam reflected from the mirror and the object beam coming from the reflection of the sample mutually interfere with each other, passing through another  $f = 50$  mm biconvex lens. The fringe pattern is obtained adjusting either the mirror or the cell, focused with another  $40\times$  microscope objective and projected to a translucent screen; the observed interferograms are acquired with a commercial Web Cam and recorded into a PC for further analysis.

## 5. Results

Some of the interferograms, obtained from the sample immersed in distilled water ( $H_2O_2$ ) during specified time intervals are shown in Fig. 3. Once the electrode is fixed into the cell, this is filled with the distilled water solution and the system is left some time to settle down, until the system is ready to mutually line up the beams to obtain the intensity interference pattern projected on the screen. After the appearance of the first interferograms, it can be appreciated how new maximum intensity fringes are added as time goes. This result suggests that by examining the evolution in the number of maximum fringes of intensity appearing in the visual field (Fig. 3), an approximate measure of the oxide layers growth through the electrochemical process is obtained, according to [8]:

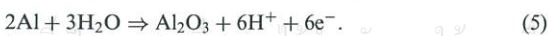


Fig. 4 shows the evolution of the observed maximum intensity fringes, and the oxide layer growth obtained through Eq. (4) as a function of time. A good correlation was obtained between both parameters showing a logarithmic growth; in fact this is the theoretical dependence obtained by fitting the oxide growth data using numerical methods (dashed line). This result is consistent with the well-known logarithmic oxidation growth observed for thin oxide layers at low temperatures, according to

$$W = k_0 \log(C_t + A), \quad (6)$$

where  $W$  is the oxide layer growth and  $k_0$ ,  $C_t$  and  $A$  are constants. Aluminium and other metals corrode in this way at ambient or slightly elevated temperatures. The exact mechanism is not well understood, but it is generally agreed that logarithmic oxidation results from the effect of electric fields within very thin oxide layers in assisting ionic transport across the corrosion products [9].

The calculated oxide growth through Eq. (4) is in the same order of magnitude, reported in the literature for similar experimental conditions. For a similar period of time, the film thickness obtained was in the order of  $4\text{--}7$   $\mu\text{m}$  [10].

## 6. Conclusions

The experimental results presented in this work show the advantage on using a non-intrusive method which can help to obtain or complement the interpretation given by conventional electrochemical measurements of corrosion rates. Also, it suggests the possibility of investigating alternative optical methods in order to improve or complete the obtained optical measurements, like electronic speckle pattern interferometry (ESPI). Lastly, an improvement of previous reported experimental proposals [1,6,7] by implementing a Michelson interferometer set-up, easier to align and control than off-axis holography, was shown. Additionally, the possibility to research into optical coherent detection techniques like those based on

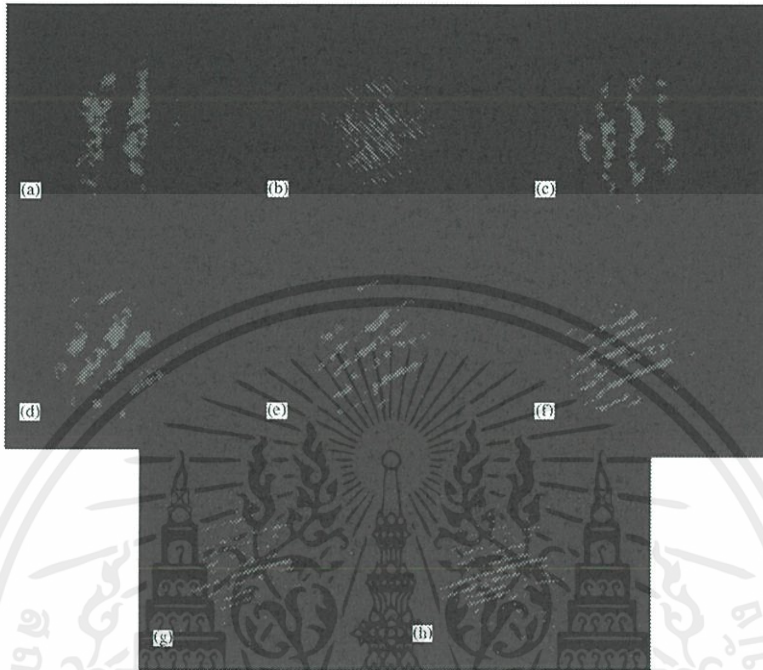


Fig. 3. Interferograms of an aluminum sample immersed into distilled water solution. (a) Without  $H_2O_2$ ; (b) with  $H_2O_2$ ; (c) calibrated at the beginning of testing; (d) after 4 h; (e) after 8 h; (f) after 12 h; (g) after 24 h; (h) after 52 h.

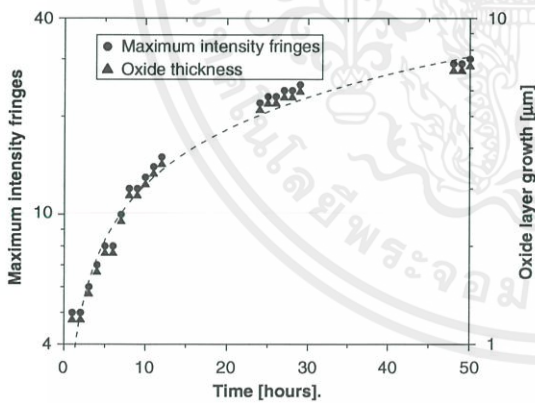


Fig. 4. Maximum intensity fringes and oxide layer growth for an aluminium sample immersed into distilled water solution ( $H_2O_2$ ). The symbols (dots and triangles) correspond to experimental and calculated data, respectively. The dashed line is a fit applied to oxide growth data, exhibiting a logarithmic dependence.

photorefractive holography [11], to carry out corrosion monitoring processes in metallic samples immersed in turbid media (i.e. water–oil interfaces), more dispersive and

complex than pure aqueous solutions so far investigated may be also of great interest.

#### Acknowledgements

O. Sarmiento-Martínez thanks the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), México, for a supporting studentship.

#### References

- [1] Ávila Mendoza J, Genescá Llongueras J. Mas allá de la herrumbre. Colección La Ciencia desde México, No. 9: FCE-SEP-CONACyT; 1986.
- [2] Hariharan P. Optical holography: principles, techniques, and applications. 2nd ed. New York: Cambridge University Press; 1996.
- [3] Habib K. In situ measurement of oxide film growth on aluminium samples by holographic interferometry. Corrosion Sci 2001;43: 449–55.
- [4] Habib K. Holographic interferometry in predicting cathodic deposition of metals in aqueous solution. Proc SPIE 1990;1230: 293–6.
- [5] Habib K. Model of holographic interferometry of anodic dissolution of metals in aqueous solution. Opt Lasers Eng 1993;18: 115–20.
- [6] Habib K. Non-destructive evaluation of metallic electrodes under corrosion fatigue conditions by holographic interferometry. Opt Lasers Eng 1995;23:213–9.

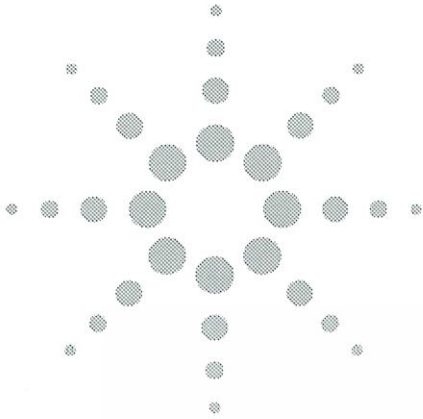
- [7] Habib K, Al-Sabti F, Al-Mazidi H. Optical corrosion-meter. Proc SPIE 1995;2577:210–7.
- [8] Lee Craig Jr. H. Kinetic studies of aluminum pitting reactions. In: Staehle RW, Brown BF, Kruger J, Agrawal A, editors. U.R. Evans conference on localized corrosion. Houston: NACE-3; 1974. p. 600–7.
- [9] Fontana MG, Greene ND. Corrosion engineering. 3rd ed. New York: McGraw-Hill Book Company; 1986.
- [10] Kaesche H. Pitting corrosion of aluminum, and intergranular corrosion of aluminum alloys. In: Staehle RW, Brown BF, Kruger J, Agrawal A, editors. U.R. Evans conference on localized corrosion. Houston: NACE-3; 1974. p. 608–12.
- [11] Hyde SCW, Jones R, Barry NP, Dainty JC, French PMW, Kwolek KM, et al. Depth-resolved holography through turbid media using photorefraction. IEEE J Selected Topics Quantum Electron 1996; 2(4):965–75.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## Agilent 53131A/132A/181A Counters

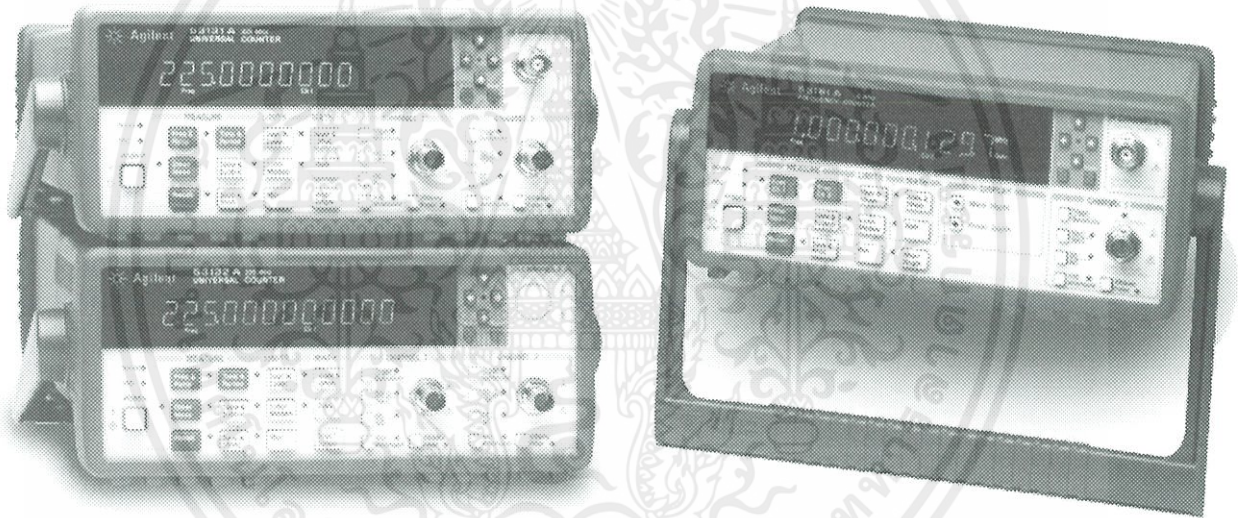
High-performance, low-cost counters simplify and speed systems and bench frequency measurements

Data Sheet

Recommended replacement products:

53200 Series RF & universal frequency counter/timers

(Data sheet publication number: 5990-6283EN)



- 225 MHz bandwidth (optional 1.5, 3, 5, or 12.4 GHz)
- 10- or 12-digit resolution with 1 s gate time
- GPIB interface and IntuiLink connectivity software standard
- Data transfer rate of up to 200 fully formatted measurements/second

### **A family of universal and RF counters to meet your needs**

Agilent Technologies 53131A/132A/181A high-performance counters give you fast, precise frequency measurements at an affordable price. These counters feature an intuitive user interface and one-button access to frequently used functions so you can make accurate measurements quickly and easily.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Agilent Technologies**

Real-time digital signal processing technology is used to analyze data while simultaneously taking new readings, speeding measurement throughput. The technology, developed for Agilent's high-end line of modulation domain analyzers, allows the counters to gather more data for each measurement, so you get higher-resolution measurements in a fraction of the time it takes other counters.

The 53131A/132A/181A counters offer built-in statistics and math functions so you can scale measurements and simultaneously measure and track average, min/max and standard deviation. Automated limit testing lets you set upper and lower limits for any measurement. An analog display mode lets you see at a glance whether a measurement is within pass/fail limits. The counters flag out-of-limit conditions and can generate an output signal to trigger external devices when a limit is exceeded. For quick access to frequently used tests, a single keystroke recalls up to 20 different stored front-panel set-ups.

For computer-controlled systems applications, each counter includes a standard GPIB interface with full SCPI-compatible programmability and a data transfer rate of up to 200 fully formatted measurements per second. The standard RS-232 talk-only interface provides printer support or data transfer to a computer through a terminal-emulation program.

#### **Agilent 53131A universal counter**

The two-channel 53131A counter offers 10 digits per second of frequency/period resolution and a bandwidth of 225 MHz. Time interval resolution is specified at 500 ps. An optional third channel provides frequency measurements up to 3 GHz, 5 GHz, or 12.4 GHz. Standard measurements include frequency, period, ratio, time interval, pulse width, rise/fall time, phase angle, duty cycle, totalize, and peak voltage.

#### **Agilent 53132A universal counter**

For applications requiring higher resolution, the 53132A offers the same features and functions as the 53131A, with up to 12 digits/sec frequency/period resolution and 150 ps time interval resolution. In addition, the 53132A offers advanced arming modes for time interval measurements.

#### **Agilent 53181A RF counter**

Optimized for RF applications, the single-channel 10 digit/s 53181A measures frequency, period and peak voltage. A digit-blanking function lets you easily eliminate unnecessary digits when you want to read measurements quickly. For higher-frequency measurements, choose an optional second channel that provides measurements up to 1.5 GHz, 3 GHz, 5 GHz, or 12.4 GHz. A self-guided shallow menu makes this counter exceptionally easy to use.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Agilent IntuiLink provides easy access to the counter's data from your PC**

The Agilent 53131A/132A/181A counters, capture precise frequency and time measurements. IntuiLink software allows that data to be put to work easily. You work in a familiar environment at all times, using PC applications such as Microsoft Excel® or Word® to analyze, interpret, display, print, and document the data you get from the counter.

It gives you the flexibility to configure and run tests from your PC making data gathering more convenient.

Agilent IntuiLink lets you:

- Configure tests, including measurement type, number of readings, measurement speed, and more.
- Choose display modes from real-time strip chart, histogram, readout, and table mode.
- Scale measurements data.
- Copy captured data to other programs.

**Optional timebases offer increased stability**

Optional timebases are available for 53131A/132A/181A counters to increase measurement accuracy. Option 010 provides a high stability oven timebase with aging of less than  $5 \times 10^{-10}$  per day.

**1-year warranty**

Each counter comes with operating, programming and service manuals, IntuiLink software, a power cord and a full 1-year warranty.

**Time Base**

**Internal time base stability** (see graph 3 for timebase contribution of measurement error)

		Standard (0° to 50°C)	Medium oven (Option 001)	High oven (Option 010)	Ultra high oven (Option 012 for 53132A only)
<b>Temperature stability (referenced to 25°C)</b>		$< 5 \times 10^{-6}$	$< 2 \times 10^{-7}$	$< 2.5 \times 10^{-9}$	$< 2.5 \times 10^{-9}$
<b>Aging rate (after 30 days)</b>	Per Day:		$< 4 \times 10^{-8}$	$< 5 \times 10^{-10}$	$< 1 \times 10^{-10}$
	Per Month:	$< 3 \times 10^{-7}$	$< 2 \times 10^{-7}$	$< 1.5 \times 10^{-8}$	$< 3 \times 10^{-9}$
	Per Year:				$< 2 \times 10^{-8}$
<b>Turn-on stability vs. time (in 30 minutes)</b>			$< 2 \times 10^{-7}$ referenced to 2 h	$< 5 \times 10^{-9}$ referenced to 24 h	$< 5 \times 10^{-9}$ referenced to 24 h
<b>Calibration</b>		Manual adjust	Electronic	Electronic	Electronic

Note that power to the time base is maintained when the counter is placed in standby via the front panel switch. The internal fan will continue to operate when in standby to maintain long-term measurement reliability.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Instrument Inputs

### Input specifications

Channel 1 & 2 (53131A, 53132A)<sup>1</sup>  
Channel 1 (53181A)

#### Frequency range

dc coupled	dc to 225 MHz
ac coupled	1 MHz to 225 MHz (50 Ω) 30 Hz to 225 MHz (1 MΩ)
FM tolerance	25%

#### Voltage range and sensitivity (Sinusoid)<sup>2</sup>

dc to 100 MHz	20 mVrms to ±5 V ac + dc
100 MHz to 200 MHz	30 mVrms to ±5 V ac + dc
200 MHz to 225 MHz	40 mVrms to ±5 V ac + dc (all specified at 75 mVrms with opt. rear connectors) <sup>3</sup>

#### Voltage range and sensitivity (Single-shot pulse)<sup>2</sup>

4.5 ns to 10 ns pulse width	100 mVpp to 10 Vpp (150 mVpp with optional rear connectors) <sup>3</sup>
>10 ns pulse width	50 mVpp to 10 Vpp (100 mVpp with optional rear connectors) <sup>3</sup>

#### Trigger level<sup>2</sup>

Range	± 5.125 V
Accuracy	± (15 mV + 1% of trigger level)
Resolution	5 mV

#### Damage level

50 Ω	5 Vrms
0 to 3.5 kHz, 1 MΩ	350 Vdc + ac pk
3.5 kHz to 100 kHz, 1 MΩ	350 Vdc + ac pk linearly derated to 5 Vrms
>100 kHz, 1 MΩ	5 Vrms

### Input characteristics

Channel 1 & 2 (53131A, 53132A)<sup>1</sup>  
Channel 1 (53181A)

Impedance	1 MΩ or 50 Ω
1 MΩ capacitance	30 pF
Coupling	ac or dc
Low-pass filter	100 kHz, switchable -20 dB at > 1 MHz
Input sensitivity	Selectable between Low, Medium, or High (default). Low is approximately 2x High Sensitivity.

#### Trigger slope

Positive or negative

#### Auto trigger level

Range	0 to 100% in 10% steps
Frequency	> 100 Hz
Input amplitude	> 100 mVpp (No amplitude modulation)

#### Attenuator

Voltage range	x10
Trigger range	x10

### Input Specifications<sup>4</sup>

Channel 3 (53131A, 53132A)  
Channel 2 (53181A)

#### Frequency range

Option 015 (for 53181A only)	100 MHz to 1.5 GHz (see Opt. 030 for additional specs)
Option 030	100 MHz to 3 GHz
Option 050	200 MHz to 5 GHz
Option 124	200 MHz to 12.4 GHz

#### Power range and sensitivity (Sinusoid)

Option 030	100 MHz to 2.7 GHz: -27 dBm to +19 dBm 2.7 GHz to 3 GHz: -21 dBm to +13 dBm
Option 050	200 MHz to 5 GHz: -23 dBm to +13 dBm
Option 124	200 MHz to 12.4 GHz -23 dBm to +13 dBm

#### Damage level

Option 030	5 Vrms
Option 050	+25 dBm
Option 124	+25 dBm

### Characteristics

Impedance	50 Ω
Coupling	AC
VSWR	< 2.5:1

### External arm input specifications<sup>5</sup>

#### Signal input range

TTL compatible

#### Timing Restrictions

Pulse width	> 50 ns
Transition time	< 250 ns
Start-to-stop time	> 50 ns

#### Damage level

10 Vrms

### External arm input characteristics<sup>5</sup>

Impedance	1 kΩ
Input capacitance	17 pF
Start/stop slope	Positive or negative

### External time base input specifications

Voltage range	200 mVrms to 10 Vrms
Damage level	10 Vrms
Frequency	1 MHz, 5 MHz, and 10 MHz (53132A 10 MHz only)

### Time base output specifications

Output frequency	10 MHz
Voltage	> 1 Vpp into 50 Ω (centered around 0 V)

- Specifications and characteristics for Channels 1 and 2 are identical for both common and separate configurations.
- Values shown are for X1 attenuator setting. Multiply all values by 10 (nominal) when using the X10 attenuator setting.
- When the 53131A or 53132A are ordered with the optional rear terminals (Opt. 060), the channel 1 and 2 inputs are active on both front and rear of the counter. When the 53181A is ordered with the optional rear terminal, the channel 1 input is active on both front and rear of the counter. For this condition, specifications indicated for the rear connections also apply to the front connections.
- When optional additional channels are ordered with Opt. 060, refer to configuration table for Opt. 060 under ordering info on page 8. There is no degradation in specifications for this input, as applicable.
- Available for all measurements except peak volts. External arm is referred to as external gate for some measurements.

**For automatic or external arming:**  
(and signals < 100 Hz using timed arming)

$$\text{LSD displayed: } \left( \frac{t_{res}}{\text{Gate time}} \right) \times \frac{\text{Frequency or period}}$$

$$\text{RMS resolution: } \left( \frac{\sqrt{t_{res}^2 + (2 \times \text{Trigger error})^2}}{\text{Gate time}} \right) \times \frac{\text{Frequency or period}}$$

	53131A $t_{res}$	53137A $t_{res}$	53181A $t_{res}$
typical	650 ps	200 ps	650 ps

see graphs for worst case resolution performance

For automatic arming:  $\text{Gate time} = \frac{N}{\text{Frequency}}$

where N = 1 for standard channel frequency < 1 MHz  
4 for standard channel frequency > 1 MHz  
128 for optional channel

$$\text{Systematic uncertainty: } \left( \pm \text{Time base error} \pm \frac{t_{acc}}{\text{Gate time}} \right) \times \frac{\text{Frequency or period}}$$

	53131A $t_{acc}$	53132A $t_{acc}$	53181A $t_{acc}$
Typical	350 ps	100 ps	350 ps
Worst case	1.25 ns	500 ps	1.25 ns

**Trigger:** Default setting is auto trigger at 50%

**For time or digits arming:**

$$\text{LSD displayed: } \left( \frac{2\sqrt{2} \times t_{res}}{\text{Gate time} \times \sqrt{\text{Number of samples}}} + \frac{t_{jitter}}{\text{Gate time}} \right) \times \frac{\text{Frequency or period}}$$

$$\text{RMS resolution (see graph 2): } \left( \frac{4 \times \sqrt{t_{res}^2 + (2 \times \text{Trigger error})^2}}{\text{Gate time} \times \sqrt{\text{Number of samples}}} + \frac{t_{jitter}}{\text{Gate time}} \right) \times \frac{\text{Frequency or period}}$$

	53131A/181A		53132A	
	$t_{res}$	$t_{jitter}$	$t_{res}$	$t_{jitter}$
Typical	500 ps	50 ps	225 ps	3 ps

See graphs for worst case resolution performance

Number of samples = Gate time × Frequency (Frequency < 200 kHz)  
Gate time × 200,000 (Frequency > 200 kHz)

$$\text{Systematic uncertainty: } \left( \pm \text{Time base error} \pm \frac{t_{acc}}{\text{Gate time}} \right) \times \frac{\text{Frequency or period}}$$

	53131A/181A $t_{acc}$	53132A $t_{acc}$
Typical	100 ps	10 ps
Worst case	300 ps	100 ps

**Trigger:** Default setting is auto trigger at 50%

## Measurement Specifications

### Frequency (53131A, 53132A, 53181A)

#### Channel 1 and 2 (53131A, 53132A) Channel 1 (53181A)

Range 0.1 Hz to 225 MHz

#### Channel 3 (53131A, 53132A) Channel 2 (53181A)

Option 015 100 MHz to 1.5 GHz  
(53181A only)

Option 030 100 MHz to 3 GHz

Option 050 200 MHz to 5 GHz

Option 124 200 MHz to 12.4 GHz

(Period 2 or 3 selectable via GPIB only)

### Period (53131A, 53132A, 53181A)

#### Channel 1 and 2 (53131A, 53132A) Channel 1 (53181A)

Range 4.44 ns to 10 s

#### Channel 3 (53131A, 53132A) Channel 2 (53181A)

Option 015 0.66 ns to 10 ns  
(53181A only)

Option 030 0.33 ns to 10 ns

Option 050 0.2 ns to 5 ns

Option 124 80 ps to 5 ns

### Frequency ratio (53131A, 53132A, 53181A)

Measurement is specified over the full signal range of each input.

Results range  $10^{-10}$  to  $10^{11}$

"Auto" gate time 100 ms

### Time interval (53131A, 53132A)

Measurement is specified over the full signal ranges<sup>5</sup> of Channels 1 and 2.

Results range -1 ns to  $10^5$  s

LSD 500 ps (53131A)/150 ps (53132A)

### Phase (53131A, 53132A)

Measurement is specified over the full signal range of Channels 1 and 2.

Results range  $-180^\circ$  to  $+360^\circ$

### Duty cycle (53131A, 53132A)

Measurement is specified over the full signal range of Channel 1. However, both the positive and negative pulse widths must be greater than 4 ns.

Results range 0 to 1 (e.g. 50% duty cycle would be displayed as .5)

### Rise/fall time (53131A, 53132A)

Measurement is specified over the full signal ranges of Channel 1. The interval between the end of one edge and start of a similar edge must be greater than 4 ns.

Edge selection Positive or negative

Trigger Default setting is auto trigger at 10% and 90%

Results range 5 ns to  $10^5$  s

LSD 500 ps (53131A)/150 ps (53132A)

### Pulse width (53131A, 53132A)

Measurement is specified over the full signal range of Channel 1. The width of the opposing pulse must be greater than 4 ns.

Pulse selection Positive or negative

Trigger Default setting is auto trigger at 50%

Results range 5 ns to  $10^5$  s

LSD 500 ps (53131A)/150 ps (53132A)

### Totalize (53131A, 53132A)

Measurement is specified over the full signal range of Channel 1.

Results range 0 to  $10^{15}$

Resolution  $\pm 1$  count

### Peak volts (53131A, 53132A, 53181A)

Measurement is specified on Channels 1 and 2 for dc signals; or for ac signals of frequencies between 100 Hz and 30 MHz with peak-to-peak amplitude greater than 100 mV.

Results range -5.1 V to +5.1 V

Resolution 10 mV

### Peak volts systematic uncertainty

for ac signals: 25 mV + 10% of V

for dc signals: 25 mV + 2% of V

Use of the input attenuator multiplies all voltage specifications (input range, results range, resolution and systematic uncertainty) by a nominal factor of 10.

### Gate time

Auto mode, or 1 ms to 1000 s

### Measurement throughput

GPIB ASCII 200 measurements/s (maximum)

### Measurement arming

Start measurement Free run, manual, or external

Stop measurement Continuous, single, external, or timed

Time interval 100  $\mu$ s to 10 s (53131A)

Delayed arming 100 ns to 10 s (53132A)

### Arming modes

(Note that not all arming modes are available for every measurement function.)

5. Available for all measurements except peak volts. External arm is referred to as external gate for some measurements.

6. See specifications for pulse width and rise/fall time measurements for additional restrictions on signal timing characteristics.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Time interval, pulse width, rise/fall time (53131A and 53132A only):**

**RMS resolution:**  $\sqrt{(t_{res})^2 + \text{Start trigger error}^2 + \text{Stop trigger error}^2}$

**Systematic uncertainty:**

$\pm (\text{Time base error} \times \text{Measurement})$  Trigger level timing error  $\pm 1.5$  ns Differential channel error (53131A)  
 $\pm (\text{Time base error} \times \text{Measurement})$  Trigger level timing error  $\pm 900$  ps Differential channel error (53132A)  
where  $t_{res} = 750$  ps for the 53131A, 300 ps for the 53132A

**Frequency ratio:**  $\frac{Ch1}{Ch2}, \frac{Ch1}{Ch3}, \frac{Ch2}{Ch1}, \frac{Ch3}{Ch1}$  (53131A and 53132A)  $\frac{Ch1}{Ch2}, \frac{Ch2}{Ch1}$  (53181A)

**LSD: Ratio  $\frac{1}{2}$ :**  $\frac{1}{Ch2 \text{ Freq} \times \text{Gate time}}$  **Ratio  $\frac{2}{1}$ :**  $\frac{Ch2 \text{ Freq}}{(Ch1 \text{ Freq})^2 \times \text{Gate time}}$

**RMS Resolution: Ratio  $\frac{1}{2}$ :**  $\frac{2 \times \sqrt{1 + (Ch1 \text{ Freq} \times Ch2 \text{ Trigger error})^2}}{Ch2 \text{ Freq} \times \text{Gate time}}$

**Ratio  $\frac{2}{1}$ :**  $\frac{2 \times Ch2 \text{ Freq} \times \sqrt{1 + (Ch1 \text{ Freq} \times Ch2 \text{ Trigger error})^2}}{(Ch1 \text{ Freq})^2 \times \text{Gate time}}$

For measurements using Ch3, substitute Ch3 for Ch2 in these equations. To minimize relative phase measurement error, connect the higher frequency signal to channel 1.

**Systematic uncertainty:**  $\pm 2x$  resolution

**Phase (53131A and 53132A)**

**RMS resolution:**  $\sqrt{((T_{res})^2 + (2 \times \text{Trigger error}^2)) \times \left(1 + \left(\frac{\text{Phase}}{360^\circ}\right)^2\right) \times \text{Frequency} \times 360^\circ}$

**Systematic uncertainty:**

$(\pm \text{Trigger level timing error} \pm 1.5$  ns Differential channel error)  $\times \text{Frequency} \times 360^\circ$  (53131A)  
 $(\pm \text{Trigger level timing error} \pm 900$  ps Differential channel error)  $\times \text{Frequency} \times 360^\circ$  (53132A)

**Duty cycle (53131A and 53132A)**

**RMS resolution:**  $\sqrt{((T_{res})^2 + (2 \times \text{Trigger error}^2)) \times (1 + \text{Duty cycle}^2) \times \text{Frequency}}$

$t_{res}$	53131A	53132A
	750 ps	300 ps

**Auto arming:** Measurements are initiated immediately and acquired as fast as possible, using a minimum number of signal edges.

**Timed arming:** The duration of the measurement is internally timed to a user-specified value (also known as the "gate time").

**Digits arming:** Measurements are performed to the requested resolution (number of digits) through automatic selection of the acquisition time.

**External arming:** An edge on the external arm Input enables the start of each measurement. Auto arming, timed arming modes or another edge on the external arm input may be used to complete the measurement.

**Time interval delayed arming:** For time interval measurements, the stop trigger condition is inhibited for a user-specified time following the start trigger. The 53132A offers advanced time interval arming capabilities including use of user specified time or Channel 2 events to delay both start and stop triggers.

**Measurement limits**

**Limit checking:** The measurement value is checked against user-specified limits at the end of each measurement.

**Display modes:** The measurement result may be displayed as either the traditional numeric value or graphically as an asterisk moving between two vertical bars.

**Out-of-limits Indications:**

- The limits annunciator will light on the front panel display.
- The instrument will generate an SRQ if enabled via GPIB.
- The limits hardware signal provided via the RS-232 connector will go low for the duration of the out-of-limit condition.
- If the analog display mode is enabled, the asterisk appears outside the vertical bars, which define the upper and lower limits.

### Fractional time base error (see graph 3)

Time base error is the maximum fractional frequency variation of the time base due to aging or fluctuations in ambient temperature or line voltage:

$$\text{Time base error} = \left( \frac{\Delta f}{f} \text{ Aging rate} + \frac{\Delta f}{f} \text{ Temperature} + \frac{\Delta f}{f} \text{ Line voltage} \right)$$

Multiply this quantity by the measurement result to yield the absolute error for that measurement. Averaging measurements will not reduce (fractional) time base error. The counters exhibit negligible sensitivity to line voltage; consequently the line voltage term may be ignored.

---

### Trigger error

External source and input amplifier noise may advance or delay the trigger points that define the beginning and end of a measurement. The resulting timing uncertainty is a function of the slew rate of the signal and the amplitude of spurious noise spikes (relative to the input hysteresis band).

The (rms) trigger error associated with a single trigger point is:

$$\text{Trigger error} = \frac{\sqrt{(E_{input})^2 + (E_{signal})^2}}{\text{Input signal slew rate at trigger point}} \text{ (in seconds)}$$

where

$E_{input}$  = RMS noise of the input amplifier: 1 mVrms (350  $\mu$ Vrms typical). Note that the internal measurement algorithms significantly reduce the contribution of this term.

$E_{signal}$  = RMS noise of the input signal over a 225 MHz bandwidth (100 kHz bandwidth when the low-pass filter is enabled). Note that the filter may substantially degrade the signal's slew rate at the input of the trigger comparator.

For two-trigger-point measurements (e.g. rise time, pulse width), the trigger errors will be referred to independently as start trigger error and stop trigger error.

---

### Trigger level timing error (see graph 6)

Trigger level timing error results from a deviation of the actual trigger level from the specified level.

The magnitude of this error depends on resolution and accuracy of the trigger level circuit, input amplifier fidelity, input signal slew rate, and width of the input hysteresis band.

The following equations should be summed together to obtain the overall trigger level timing error.

At the "High" sensitivity input setting, the hysteresis band can be assumed to be the sensitivity of the counter input (see page 2). Reduction of input sensitivity or use of the attenuator will increase the size of this band.

$$\text{Input hysteresis error: } \frac{0.5 \times \text{hysteresis band}}{\text{Input signal slew rate at start trigger point}} - \frac{0.5 \times \text{hysteresis band}}{\text{Input signal slew rate at stop trigger point}}$$

$$\text{Trigger level setting error: } \pm \frac{15 \text{ mV} \pm (1\% \times \text{start trigger level setting})}{\text{Input signal slew rate at start trigger point}} \pm \frac{15 \text{ mV} \pm (1\% \times \text{stop trigger level setting})}{\text{Input signal slew rate at stop trigger point}}$$

---

### Differential channel error

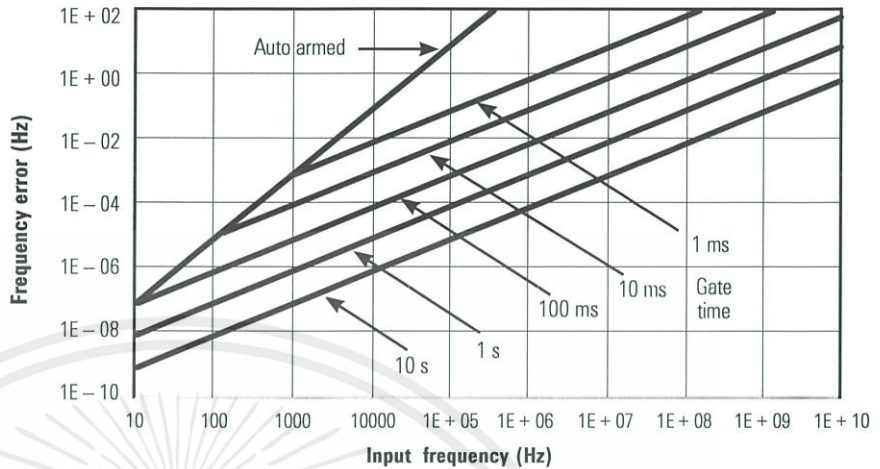
The differential channel error term stated in several systematic uncertainty equations accounts for channel-to-channel mismatch and internal noise. This error can be substantially reduced by performing a TI calibration (accessible via the utility menu) in the temperature environment in which future measurements will be made.

**Graph 1:**  
**Agilent 53131A/181A–Worst case**  
**RMS resolution<sup>7</sup>**  
 (Automatic or external arming)

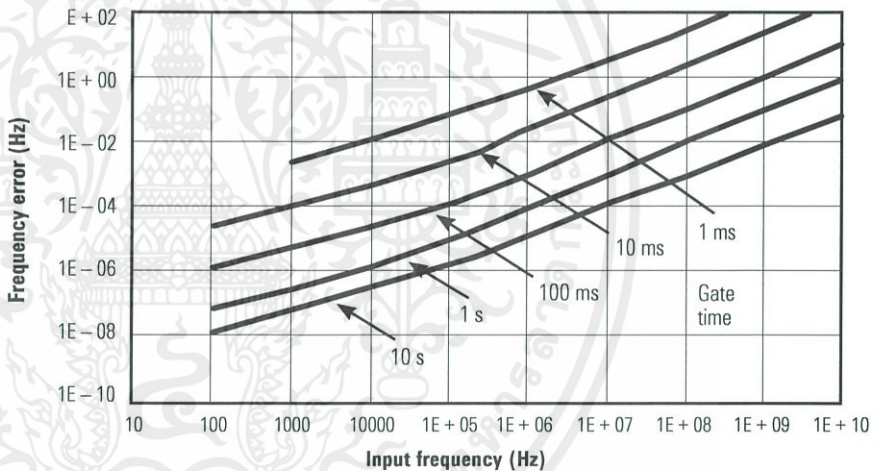
The graphs may also be used to compute errors for period measurements. To find the period error (DP), calculate the frequency of the input signal ( $F = 1/P$ ) and find the frequency error (DF) from the chart.

Then calculate the period error as:

$$\Delta P = \left( \frac{\Delta F}{F} \right) \times P$$



**Graph 2:**  
**Agilent 53131A/181A–Worst case**  
**RMS resolution<sup>7</sup>**  
 (Time or digits arming)



**Graph 3:**  
**Timebase error**

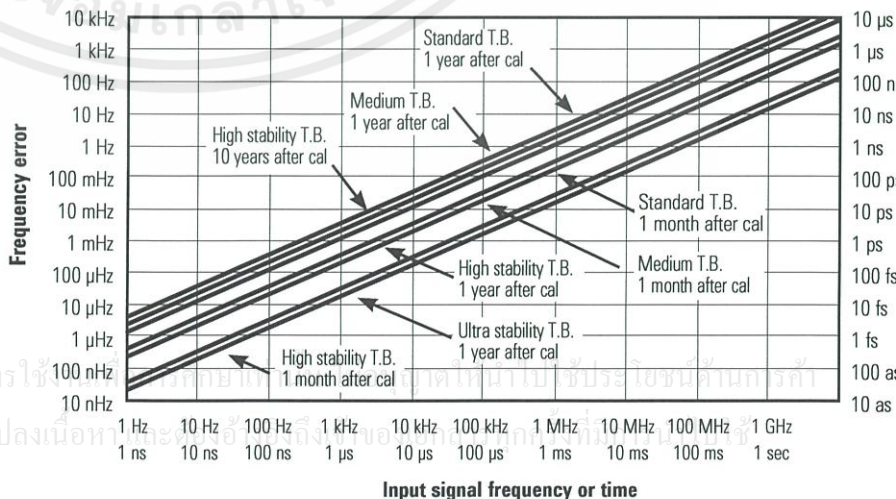
7. Graphs 1, 2, 4 and 5 do not reflect the effects of trigger error. To place an upper bound on the added effect of this error term, determine the frequency error from the appropriate graph and add a trigger error term as follows:

Time or digit arming

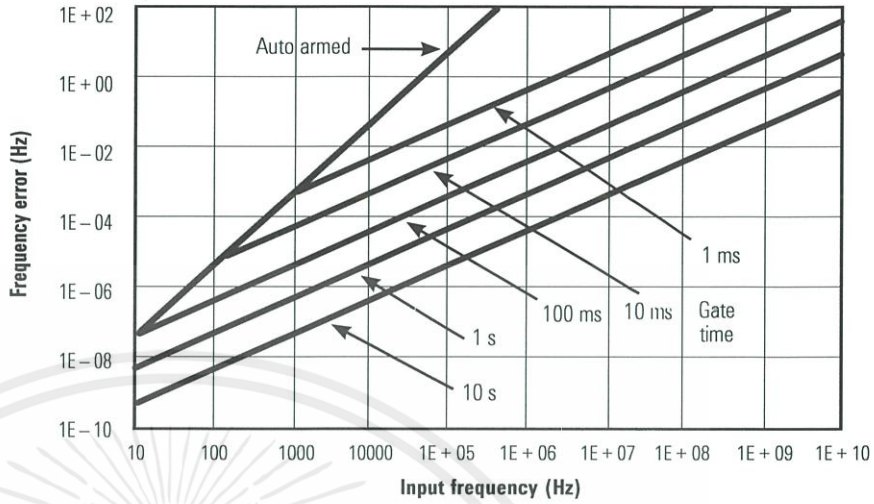
$$\text{Frequency error} + \left( \frac{4 \times \sqrt{2} \times \text{Trigger error}}{\text{Gate time} \times \sqrt{\text{Number of samples}}} \right) \times \frac{\text{Frequency or period}}{\text{period}}$$

Automatic or external arming

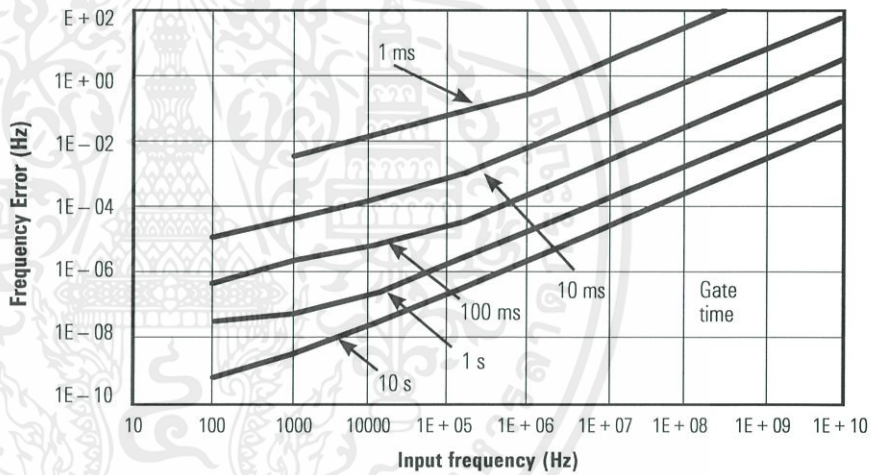
$$\text{Frequency error} + \left( \frac{\sqrt{2} \times \text{Trigger error}}{\text{Gate time}} \right) \times \frac{\text{Frequency or period}}{\text{period}}$$



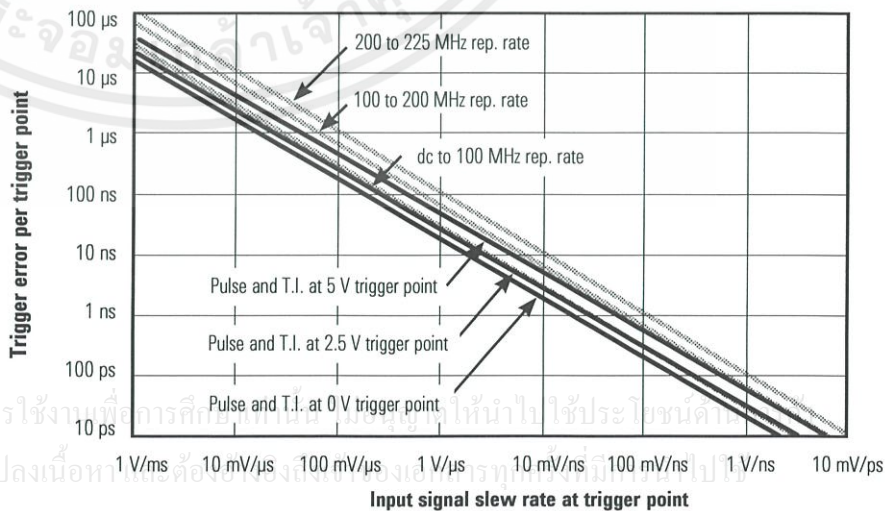
**Graph 4:**  
**Agilent 53132A—Worst case**  
**RMS resolution<sup>7</sup>**  
 (Automatic or external arming)



**Graph 5:**  
**Agilent 53132A—Worst case**  
**RMS resolution<sup>7</sup>**  
 (Time or digits arming)



**Graph 6:**  
**Trigger level timing error**  
 (Level setting error and  
 input hysteresis)



7. Graphs 1, 2, 4 and 5 do not reflect the effects of trigger error. To place an upper bound on the added effect of this error term, determine the frequency error from the appropriate graph and add a trigger error term as follows:

Time or digit arming

$$\text{Frequency error} + \left( \frac{4 \times \sqrt{2} \times \text{Trigger error}}{\text{Gate time} \times \sqrt{\text{Number of samples}}} \right) \times \frac{\text{Frequency or period}}{\text{period}}$$

Automatic or external arming

$$\text{Frequency error} + \left( \frac{\sqrt{2} \times \text{Trigger error}}{\text{Gate time}} \right) \times \frac{\text{Frequency}}{\text{period}}$$

## Measurement Statistics

### Available statistics

Mean, Minimum, Maximum, Standard Deviation

### Number of measurements 2 to 1,000,000.

Statistics may be collected on all measurements or on only those which are between the limit bands. When the limits function is used in conjunction with statistics, N (number of measurements) refers to the number of in-limit measurements. In general, measurement resolution will improve in proportion to N, up to the numerical processing limits of the instrument.

### Measurements

Statistics may be collected for all measurements except peak volts and totalize.

## General Information

### Save and recall

Up to 20 complete instrument setups may be saved and recalled later. These setups are retained when power is removed from the counter.

### Rack dimensions (HxWxD)

88.5 mm x 212.6 mm x 348.3 mm

### Weight

3.5 kg maximum

### Warranty

1 year

### Power supply

100 to 120 VAC  $\pm$  10% -50, 60 or 400 Hz  $\pm$  10% 220 to 240 VAC  $\pm$  10% -50 or 60 Hz  $\pm$  10%

### ac Line selection

Automatic

### Power requirements

170 VA maximum (30 W typical)

### Environment

0°C to 55°C operating  
-40°C to 71°C storage

### Remote Interface

GPIOB (IEEE 488.1-1987,  
IEEE 488.2-1987)

### Remote programming language

SCPI-1992.0 (Standard Commands  
for Programmable Instruments)

### Safety

Designed in compliance with IEC-1010,  
UL-3111-1 (draft), CAN/CSA 1010.1

### EMC

CISPR-11, EN50082-1,  
IEC 801-2, -3, -4

### Radiated immunity testing

When the product is operated at maximum sensitivity (20 mVrms) and tested at 3 V/m according to IEC 801-3, external 100 to 200 MHz electric fields may cause frequency miscounts.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Ordering Information

### 53131A

10 digit/s, 500 ps universal counter

### 53132A

12 digit/s, 150 ps universal counter

### 53181A

10-digit/s RF counter

### Accessories included

Each counter comes with IntuiLink software, standard timebase, and power cord. CD with the following: IntuiLink software, Operating, Programming, Service and Getting Started Guides, a data sheet, and application notes.

### Manual options

(please specify one when ordering)

ABA	US English
ABD	German
ABE	Spanish
ABF	French
ABJ	Japanese
ABZ	Italian
AB0	Taiwan Chinese
AB1	Korean
AB2	Chinese

### Other options

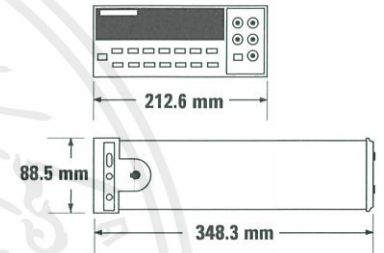
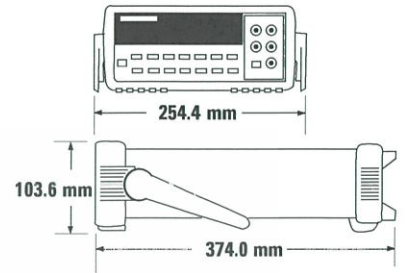
Opt. 001	Medium-stability timebase
Opt. 010	High-stability timebase
Opt. 012	Ultra-high stability timebase (53132A only)
Opt. 015	1.5 GHz RF input Ch 2 for 53181A only
Opt. 030	3 GHz RF input Ch 3 (Ch 2 on 53181A)
Opt. 050	5 GHz RF input with type N connector Ch 3 (Ch 2 on 53181A)
Opt. 124	12.4 GHz RF input with type N connector Ch 3 (Ch 2 on 53181A)
Opt. 060	Rear-panel connectors*
Opt. A6J	ANSI Z540 compliant calibration

### \*Opt 060 configuration table

53131A/132A	
Ch1 & Ch2	front & rear (in parallel)
Ch3	Opt. 030 rear only, front plugged
Ch3	Opt. 050/124 front only
Ch2	Opt. 050/124 front only
53181	
Ch1	front & rear (in parallel)
Ch2	Opt. 015/030 rear only, front plugged
Ch2	Opt. 050/124 front only

### Accessories

34131A	Hard carrying case
34161A	Accessory pouch
34190A	Rackmount kit: designed for use with only one instrument, mounted on either the left or the right side of the rack.
34191A	2U dual flange kit: secures the instrument to the front of the rack. This kit can be used with the 34194A dual lock link kit to mount two half-width, 2U height instruments side-by-side.
34194A	Dual lock link kit: recommended for side-by-side combinations and includes links for instruments of different depths. This kit can be used with the 34191A 2U dual flange kit to mount two half-width, 2U height instruments side-by-side.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน โปรดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาก่อนการเผยแพร่เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[www.agilent.com](http://www.agilent.com)  
[www.agilent.com/find/counters](http://www.agilent.com/find/counters)

For more information on Agilent Technologies' products, applications or services, please contact your local Agilent office. The complete list is available at:

[www.agilent.com/find/contactus](http://www.agilent.com/find/contactus)

#### Americas

Canada	(877) 894 4414
Brazil	(11) 4197 3500
Mexico	01800 5064 800
United States	(800) 829 4444

#### Asia Pacific

Australia	1 800 629 485
China	800 810 0189
Hong Kong	800 938 693
India	1 800 112 929
Japan	0120 (421) 345
Korea	080 769 0800
Malaysia	1 800 888 848
Singapore	1 800 375 8100
Taiwan	0800 047 866
Other AP Countries	(65) 375 8100

#### Europe & Middle East

Belgium	32 (0) 2 404 93 40
Denmark	45 70 13 15 15
Finland	358 (0) 10 855 2100
France	0825 010 700*
	*0.125 €/minute
Germany	49 (0) 7031 464 6333
Ireland	1890 924 204
Israel	972-3-9288-504/544
Italy	39 02 92 60 8484
Netherlands	31 (0) 20 547 2111
Spain	34 (91) 631 3300
Sweden	0200-88 22 55
United Kingdom	44 (0) 131 452 0200

For other unlisted countries:

[www.agilent.com/find/contactus](http://www.agilent.com/find/contactus)

Revised: June 8, 2011

Product specifications and descriptions in this document subject to change without notice.

© Agilent Technologies, Inc. 2006, 2011  
Published in USA, November 8, 2011  
5967-6039EN

#### Agilent Email Updates

[www.agilent.com/find/emailupdates](http://www.agilent.com/find/emailupdates)  
Get the latest information on the products and applications you select.



#### [www.axiestandard.org](http://www.axiestandard.org)

AdvancedTCA® Extensions for Instrumentation and Test (AXIe) is an open standard that extends the AdvancedTCA for general purpose and semiconductor test. Agilent is a founding member of the AXIe consortium.



#### [www.lxistandard.org](http://www.lxistandard.org)

LAN eXtensions for Instruments puts the power of Ethernet and the Web inside your test systems. Agilent is a founding member of the LXI consortium.



#### [www.pxisa.org](http://www.pxisa.org)

PCI eXtensions for Instrumentation (PXI) modular instrumentation delivers a rugged, PC-based high-performance measurement and automation system.

#### Agilent Channel Partners

#### [www.agilent.com/find/channelpartners](http://www.agilent.com/find/channelpartners)

Get the best of both worlds: Agilent's measurement expertise and product breadth, combined with channel partner convenience.



Agilent Advantage Services is committed to your success throughout your equipment's lifetime. To keep you competitive, we continually invest in tools and processes that speed up calibration and repair and reduce your cost of ownership. You can also use Infoline Web Services to manage equipment and services more effectively. By sharing our measurement and service expertise, we help you create the products that change our world.

[www.agilent.com/find/advantageservices](http://www.agilent.com/find/advantageservices)



[www.agilent.com/quality](http://www.agilent.com/quality)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Agilent Technologies**